
Évolution de la variabilité de la fréquence cardiaque lors d'une induction combinée de fatigue mentale et physique

Auteur : Pierard, Alexandre

Promoteur(s) : Collette, Fabienne

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

Diplôme : Master en sciences psychologiques, à finalité spécialisée

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/25345>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Évolution de la variabilité de la fréquence cardiaque lors d'une induction combinée de fatigue mentale et physique

Mémoire en vue de l'obtention du grade de master en sciences psychologiques

PIERARD Alexandre

Promotrice : Fabienne COLLETTE

Superviseurs : Maëlle CHARONITIS, John READ

Années académiques 2025-2026

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer mes plus sincères remerciements à Madame COLLETTE Fabienne, promotrice de ce mémoire et à l'origine, en collaboration avec Monsieur SCHWARTZ Cédric, de ce projet passionnant, pour ses conseils et son expertise.

Je souhaite également remercier READ John et CHARONITIS Maëlle, superviseurs de ce travail, pour leur implication, leur temps et leurs conseils. Je souhaite ajouter une mention particulière à John, dont la disponibilité, l'accompagnement précieux, la bienveillance et l'expertise ont été déterminants pour ce mémoire.

Je remercie également MENTIOR Flora qui m'a accompagné durant les sessions de testing ;

Merci également aux participants qui ont accepté de participer à ce projet.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour son soutien indéfectible et mes amis pour leur présence et leurs encouragements durant ces années d'études. Une mention particulière à ma mère qui a pris le temps de relire ce travail, à mon père pour ses conseils, à mon frère pour son soutien, à Laurie pour sa présence et à Circé, qui m'a accompagné tout au long de ce master.

Index des tableaux et des figures

Tableaux :

Tableau 1. Résumé des différents indices de VFC.....	21
Tableau 2. Indices retenus dans le cadre de l'étude	21
Tableau 3. Évolution des différents domaines de VFC.....	24
Tableau 4. Caractéristiques générales des participants	27
Tableau 5. ANOVA à mesure répétée 2 (condition : simple vs double) x 4 (temps : bloc 1 vs bloc 2 vs bloc 3 vs bloc 4) VAS.....	37
Tableau 6. ANOVA à mesure répétée 2 (condition : simple vs double) x 4 (temps : bloc 1 vs bloc 2 vs bloc 3 vs bloc 4) VFC	40
Tableau 7. Matrice de corrélation entre les VAS (EM, EP, FM, FP) et les indices de VFC (RMSSD, LF) pour la condition fatigue physique simple.	43
Tableau 8. Matrice de corrélation entre les VAS (EM, EP, FM, FP) et les indices de VFC (RMSSD, LF) pour la condition fatigue combinée.	44

Figures :

Figure 1. Distinction fatigue centrale – fatigue périphérique.....	13
Figure 2. Illustration variation de la fréquence cardiaque.....	18
Figure 3 Illustration des voies afférentes et efférentes SNA.....	18
Figure 4. Déroulement d'une séance.....	31
Figure 5 .Illustration TLDB	32
Figure 6. Illustration setup Condition double.....	32
Figure 7. Estimation des moyennes marginales de la VAS EM temps*condition.....	38
Figure 8. Estimation des moyennes marginales de la VAS EP temps*condition	38
Figure 9. Estimation des moyennes marginales de la VAS FM temps*condition.....	39
Figure 10. Estimation des moyennes marginales de la VAS FP temps*condition	40
Figure 11. Estimation des moyennes marginales du RMSSD temps*condition.....	41
Figure 12. Estimation des moyennes marginales du LF condition*temps.....	42
Figure 13. Estimation des moyennes marginales du SampEn temps*condition.....	43

Liste des Annexes

Annexe 1. Test de Shapiro-Wilk – scores delta VAS	69
Annexe 2. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VAS EM.....	69
Annexe 3. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VAS EP	70
Annexe 4. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VAS FM	70
Annexe 5. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VAS FP	70
Annexe 6. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VFC RMSSD.....	71
Annexe 7. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VFC LF	71
Annexe 8. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VFC SampEn.....	71
Annexe 9. Grille d'utilisation de l'intelligence artificielle.....	72

1.	INTRODUCTION	5
2.	REVUE DE LA LITTÉRATURE	6
2.1	LA FATIGUE, UN CONCEPT MULTIDIMENSIONNEL	6
2.1.1.	DEFINITION GENERALE	6
2.1.2.	IMPACT SUR LA PERFORMANCE, LA SANTE, LA SECURITE (TRAVAIL, SPORT, VIE QUOTIDIENNE)	7
2.1.3.	MESURE DE LA FATIGUE	8
2.2	FATIGUE MENTALE	8
2.2.1.	DEFINITION	8
2.2.2.	MECANISMES	9
2.2.3.	MESURES	11
2.3	FATIGUE PHYSIQUE	12
2.3.1.	DEFINITION	12
2.3.2.	MECANISMES	12
2.3.3.	MESURES	13
2.4	LIENS ENTRE LA FATIGUE PHYSIQUE ET LA FATIGUE MENTALE	14
2.4.1.	INFLUENCE DE LA FATIGUE MENTALE SUR LES PERFORMANCES PHYSIQUES	14
2.4.2.	INFLUENCE DE LA FATIGUE PHYSIQUE SUR LES PERFORMANCES COGNITIVES	16
2.5	LA VARIABILITE DE LA FREQUENCE CARDIAQUE (VFC)	17
2.5.1.	MESURE DE LA VFC	19
2.5.2.	EVOLUTION DE LA VFC	22
2.5.2.1.	EVOLUTION DANS LA FATIGUE MENTALE	22
2.5.2.2.	EVOLUTION DANS LA FATIGUE PHYSIQUE	23
2.6	LACUNES DANS LA LITTÉRATURE	25
3.	HYPOTHESES ET OBJECTIFS PRINCIPAUX	25
4.	METHODE	26
4.1	PARTICIPANT	27
4.2	DESIGN EXPERIMENTAL	28
4.2.1.	PROCEDURE	28
4.3	MATERIEL	31
4.3.3.	ÉCHELLE ANALOGIQUE VISUELLE ANALOGIQUE (VAS)	33
5.	ANALYSE STATISTIQUE	34
5.1	ANALYSE DES ETATS SUBJECTIFS	34
5.2	ANALYSE DE LA VFC	35
5.3	ANALYSES CORRELATIONNELLES	35
6.	RESULTATS	37
6.1	ÉTATS SUBJECTIFS (VAS)	37
6.2	VFC	40
6.2.1.	RMSSD	41
6.2.2.	LF	41
6.2.3.	SAMPEN	42
6.3	ANALYSES CORRELATIONNELLES	43
7.	DISCUSSION	46
7.1	ANALYSE DES RESULTATS	46
7.1.1.	INDUCTION DES ETATS DE FATIGUE ET D'EFFORT	46
7.1.2.	ÉVOLUTION DE LA VFC LORS D'UNE TACHE PHYSIQUE SEULE	48
7.1.3.	MODULATION DE LA VFC PAR L'AJOUT D'UNE TACHE COGNITIVE	49
7.1.4.	LIENS ENTRE LES MESURES SUBJECTIVES ET LA VFC	51
7.2	IMPLICATIONS THEORIQUES ET APPLICATION PRATIQUE	54
1.1.1.	IMPLICATIONS THEORIQUES	54
1.1.2.	APPLICATION PRATIQUE	55
7.3	LIMITES ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE	56
8.	CONCLUSION GENERALE	57
9.	BIBLIOGRAPHIE	59
10.	ANNEXES	69

1. Introduction

La fatigue représente un enjeu majeur de santé publique en raison de ses conséquences sur la santé, la sécurité et le fonctionnement quotidien (Gündoğan & Erdağı Oral, 2023; Mul Fedele et al., 2023; Van Cutsem et al., 2017). Elle augmente le risque d'erreurs et d'accidents dans les milieux professionnels, notamment médicaux, et contribue à une part importante des accidents de la route (Gündoğan & Erdağı Oral, 2023; Wang et al., 2023; Zhang et al., 2022). Dans le domaine sportif, la fatigue provient généralement d'une combinaison de facteurs physiques et mentaux. Un footballeur en fin de match par exemple, doit maintenir une attention soutenue et prendre des décisions rapides, tout en gérant son effort et sa fatigue physique. Cette combinaison altère par ailleurs l'endurance, augmente la perception de l'effort et dégrade les performances sportives (Van Cutsem et al., 2017). Dès lors, une meilleure compréhension des mécanismes de la fatigue et de ses différentes formes apparaît alors essentielle. Elle permettrait notamment de mieux détecter les signes précoces d'apparition de la fatigue et ainsi d'aider les athlètes à mieux gérer leurs efforts en compétition, réduisant par la même occasion le risque de blessure.

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) correspond à la variation des intervalles de temps entre deux battements cardiaques consécutifs. Elle reflète les interactions dynamiques entre les branches sympathique et parasympathique du système nerveux autonome et est donc un indicateur essentiel du fonctionnement de celui-ci (Shaffer & Ginsberg, 2017). Elle constitue par ailleurs un marqueur sensible de la charge physiologique induite par la fatigue (Shaffer & Ginsberg, 2017). Les travaux récents montrent que la fatigue mentale et la fatigue physique n'agissent pas de manière indépendante, mais interagissent et produisent des réponses physiologiques spécifiques lorsqu'elles sont combinées (Jin et al., 2024). Étudier la VFC en situation conjointe de fatigue physique et mentale permet ainsi de déterminer si cette interaction entraîne une sollicitation autonome plus marquée que dans des conditions de fatigue isolée, reflétant ainsi un contexte plus représentatif du milieu sportif.

L'objectif de ce travail est d'examiner l'évolution de la VFC lors d'une induction combinée de fatigue mentale et physique, comparée à des inductions isolées. Notre hypothèse est qu'une induction conjointe provoquera une diminution plus marquée de la VFC, reflétant une sollicitation accrue du système nerveux autonome.

2. Revue de la littérature

2.1 La fatigue, un concept multidimensionnel

2.1.1. Définition générale

La fatigue est un phénomène complexe, de par la diversité des disciplines qui l'étudient et la multiplicité des termes employés pour la définir, et multidimensionnel par ses aspects à la fois objectifs et subjectifs (Skau et al., 2021). Elle intéresse de nombreux champs de recherche, de la physiologie de l'exercice à la psychologie, en passant par les neurosciences et la médecine (Skau et al., 2021). Les définitions de la fatigue ont longtemps été sujettes à controverse et à un flou conceptuel en raison de la diversité des contextes d'étude et des approches disciplinaires (Phillips, 2015; Skau et al., 2021).

Dans le cadre cette étude, nous pouvons définir la fatigue comme « une diminution de la capacité à réaliser une activité physique et/ou mentale, attribuée à un déséquilibre dans la disponibilité, l'utilisation ou la restauration des ressources nécessaires à cette activité (Aaronson et al., 1999). On peut distinguer la fatigue en deux types, à savoir la fatigue mentale et la fatigue physique (Ibrahim et al., 2023; Mizuno et al., 2011; Wang et al., 2023; Wensink et al., 2023). La fatigue physique est une forme d'épuisement se traduisant par une incapacité à maintenir sa force ou sa puissance, résultant de mouvements musculaires répétés (Kunasegaran et al., 2023; Mizuno et al., 2011). La fatigue mentale se définit comme un état de lassitude psychobiologique provoqué par des périodes prolongées d'activités exigeantes sur le plan cognitif, entraînant une diminution de l'efficacité des performances mentales (Jin et al., 2024; Kunasegaran et al., 2023)

Il est également pertinent de différencier les notions de fatigue d'état et de fatigue-trait. La première fait référence à une sensation momentanée de fatigue dans un contexte donné tel que la réalisation d'un effort, et qui s'estompe avec le repos. La seconde correspond quant à elle à une disposition générale à ressentir de la fatigue sur une période de temps prolongée, indépendante du repos. Nous distinguons également la fatigue dite pathologique, c'est-à-dire survenant dans un contexte clinique qui interfère aussi avec le fonctionnement quotidien de façon chronique (Skau et al., 2021).

La littérature récente insiste sur la nécessité d'une clarification conceptuelle, de manière à permettre une communication transdisciplinaire efficace et à éviter la confusion entre deux

approches complémentaires de la fatigue (Blain et al., 2019; Phillips, 2015; Skau et al., 2021). Tout d'abord, l'évaluation subjective de la fatigue correspond à la perception individuelle d'une diminution des capacités à effectuer une activité physique et/ou mentale, se manifestant par une sensation de lassitude, une baisse d'énergie ou un besoin accru de repos. Ensuite, l'évaluation objective, appelé fatigabilité, désigne une réduction mesurable de la performance lors de la réalisation d'une tâche nécessitant un effort, observée par rapport à une à une valeur de référence sur une période donnée (Kluger et al., 2013; Phillips, 2015; Skau et al., 2021). Ainsi, la fatigue n'est pas réductible à une simple diminution de force musculaire ou de performance cognitive, mais implique une interaction dynamique entre des processus physiologiques, psychologiques et contextuels (Müller & Apps, 2019; Phillips, 2015; Skau et al., 2021).

Cette distinction est centrale pour la recherche et la clinique, car une même personne peut ressentir une forte fatigue subjective sans altération mesurable de ses performances, grâce notamment à l'engagement de mécanismes compensatoires, permettant de maintenir un niveau de performance stable malgré l'apparition de la fatigue, au prix d'un coût physiologique, c'est-à-dire un effort à fournir et un épuisement physique plus important, ou cognitif accru, ou à l'inverse, présenter une fatigabilité élevée sans plainte de fatigue (Millet et al., 2023; Phillips, 2015). Cette dissociation souligne que le maintien des performances ne reflète pas nécessairement l'absence de fatigue, mais peut au contraire témoigner d'une mobilisation accrue des ressources attentionnelles, motivationnelles ou physiologiques afin de compenser les effets de la fatigue. En effet, lorsqu'il y a un enjeu externe suffisamment important, un individu peut passer outre les signaux de fatigue envoyés par son organisme et mobiliser davantage ses ressources pour maintenir son niveau de performance (Millet et al., 2023; Phillips, 2015).

2.1.2. Impact sur la performance, la santé, la sécurité (travail, sport, vie quotidienne)

La fatigue a un impact majeur sur la performance, la sécurité et la santé, dans des contextes variés, tels que le travail, le sport et la vie quotidienne. Dans le domaine du travail, la fatigue mentale a été identifiée comme un facteur prédictif d'une augmentation du risque d'erreurs et d'accidents (Gündoğan & Erdağı Oral, 2023; Mul Fedele et al., 2023; Van Cutsem et al., 2017). En milieu médical, la surcharge de travail conduit les soignants à un état de fatigue mentale élevé, ce qui constitue « le principal facteur responsable des erreurs médicales » (Gündoğan & Erdağı Oral, 2023). En plus d'être associée à une augmentation du risque de mortalité, la fatigue représente donc un coût économique considérable.

Une enquête menée aux États-Unis en 2007 a rapporté que les travailleurs fatigués coûtent aux employeurs 136 milliards de dollars par an en perte de productivité liée à la santé (Ricci et al., 2007).

Dans le domaine du sport, la fatigue (physique ou mentale) affecte la capacité d'endurance, la perception de l'effort, et la performance globale. Elle constitue un phénomène particulièrement répandu dans le milieu du sport de haut niveau. Des études soulignent en effet que de nombreux athlètes sont exposés à des charges d'entraînement et des contraintes de compétition élevées, rendant indispensable la gestion des risques liés à la fatigue, notamment celui de développer un surentraînement non fonctionnel, défini comme une fatigue persistant plusieurs semaines à plusieurs mois malgré le repos (Halson, 2014). Mieux comprendre les mécanismes et les marqueurs de la fatigue chez l'athlète représente donc un enjeu scientifique et pratique majeur pour optimiser la performance et préserver la santé.

Enfin, dans de nombreuses pathologies où la fatigue est chronique et invalidante, cette dernière « impacte la qualité de vie, réduit la capacité à réaliser les activités de la vie quotidienne, et a des conséquences socioéconomiques, telles qu'une diminution du retour à l'emploi » (Millet et al., 2023; Wensink et al., 2023). Chez les patients atteints de maladies chroniques ou après un séjour en soins intensifs, la fatigue peut persister plusieurs mois, voire des années, et compromettre durablement la réinsertion sociale et professionnelle (Millet et al., 2023; Souron et al., 2021).

Pour toutes ces raisons, la compréhension des mécanismes de la fatigue est un enjeu de santé publique majeur. L'amélioration de sa prévention et de sa prise en charge semble essentielle, tant pour limiter les risques et erreurs que pour préserver la performance au travail ainsi qu'améliorer la qualité de vie des patients.

2.1.3. Mesure de la fatigue

2.2 Fatigue mentale

2.2.1. Définition

La fatigue mentale peut être définie comme un état psychobiologique transitoire qui survient après un effort cognitif prolongé et se traduit par un sentiment subjectif de lassitude ainsi qu'une baisse de l'efficacité des performances cognitives (Boksem et al., 2006; Jin et al.,

2024; Kunasegaran et al., 2023; Phillips, 2015). Elle se manifeste notamment par une diminution progressive des capacités attentionnelles, un ralentissement du traitement de l'information et une augmentation de la propension aux erreurs à mesure que les ressources cognitives disponibles s'épuisent (Boksem et al., 2006; Lorist et al., 2005; Skau et al., 2021; Wascher et al., 2014). Parallèlement aux altérations de performance, la fatigue mentale s'accompagne généralement d'une motivation réduite à poursuivre l'effort cognitif, reflétant un désengagement progressif de la tâche (Boksem et al., 2006; Van Der Linden, 2011). Sur le plan neurophysiologique, des modifications spécifiques de l'activité cérébrale ont été associées à la fatigue mentale. Des études ont montré que la puissance des ondes thêta frontale, reconnues comme un marqueur très fiable du contrôle cognitif de haut niveau, augmentait de manière continue avec le temps passé sur la tâche. Cela suggère que cette activité thêta frontale reflète un effort cognitif croissant déployé pour maintenir le niveau de performance, plutôt qu'une simple dégradation passive des ressources (Wascher et al., 2014). Par ailleurs, Ishii et al. (2014) proposent que la fatigue mentale engage simultanément des mécanismes régulateurs opposés : un système facilitateur, impliquant une boucle thalamo-frontale, qui tend à maintenir la performance cognitive, et un système inhibiteur, impliquant le cortex insulaire et le cortex cingulaire postérieur, qui tend à la dégrader pour forcer le repos. La performance observée résulterait ainsi de l'équilibre entre ces deux systèmes. (Ishii et al., 2014). De manière plus globale, la fatigue mentale est décrite comme un état psychophysologique sous-optimal qui résulte spécifiquement d'un effort ou d'une activité mentale prolongée (Phillips, 2015; Skau et al., 2021).

2.2.2. Mécanismes

D'un point de vue mécanistique, la fatigue mentale résulterait d'une augmentation progressive du coût perçu de l'effort cognitif, reflétant une modulation dynamique de systèmes cérébraux impliqués dans le traitement de l'effort, la motivation et l'état interne du corps (Müller & Apps, 2019).

Plus précisément, des travaux récents mettent en évidence le rôle clé d'un réseau regroupant le cortex cingulaire antérieur dorsal (dACC), l'insula antérieure (AI) et le cortex préfrontal dorsolatéral (DLPFC), dans l'évaluation du rapport coût/bénéfice de l'effort et dans la persistance motivationnelle (Lim et al., 2010). Ces régions, impliquées à la fois dans le contrôle cognitif, la détection des signaux intéroceptifs et la prise de décision fondée sur l'effort, verraient leur activité modulée par la fatigue, ce qui contribuerait à une diminution de la

motivation à poursuivre la tâche (Apps et al., 2015; Lim et al., 2010; Müller & Apps, 2019). De plus, une tâche cognitive prolongée induirait au sein de ces régions des altérations métaboliques, et notamment une accumulation de glutamate susceptible de perturber la transmission de l'information entre neurones et d'augmenter progressivement le coût perçu du contrôle cognitif (Pessiglione et al., 2025).

En EEG, la fatigue mentale s'accompagne également d'une augmentation de l'activité thêta dans les régions frontales, qui constitue un marqueur physiologique solide de fatigue mentale (Wascher et al., 2014). Les auteurs distinguent deux composantes thêta qui évoluent de manière opposée au fil de la tâche. D'un côté, l'activité thêta tonique, associée à l'état de fond de l'état cérébral, augmente de façon continue tout au long d'une tâche cognitive et se trouve positivement corrélée au taux d'erreurs. Elle reflèterait l'effort mental intense déployé pour essayer de maintenir un niveau de performance acceptable face à l'épuisement des ressources cognitives. De l'autre côté, l'activité thêta phasique, induite elle par les stimuli et corrélée directement au contrôle exécutif, diminue progressivement avec le temps passé sur la tâche. Ainsi, bien que le cerveau fournisse un effort croissant pour maintenir sa performance, sa capacité à traiter efficacement les informations pertinentes diminue progressivement (Wascher et al., 2014).

De plus, la littérature met en évidence un lien direct entre fatigue mentale et système nerveux autonome (SNA) (Csathó et al., 2024; Delliaux et al., 2019; Mizuno et al., 2011; Tanaka et al., 2009). Le SNA, qui régit les fonctions corporelles involontaires, est organisé en deux branches antagonistes : la branche parasympathique d'une part, associée aux états de repos et de récupération, et la branche sympathique, mobilisée lors de situations de stress ou d'effort (Karemaker, 2017). Ces deux branches exercent un contrôle parallèle sur de nombreux organes, dont le cœur, modulant notamment la fréquence cardiaque et la variabilité de la fréquence cardiaque (Karemaker, 2017). Le lien entre la fatigue mentale et le SNA se caractérise principalement par un déséquilibre au profit d'une hyperactivité sympathique et d'une baisse de l'activité parasympathique (Mizuno et al., 2011).

Enfin, la fatigue mentale semble également affecter la prise de décision. En effet, des travaux ont montré que des participants soumis à une tâche de contrôle exécutif longue (plus de six heures) développaient un biais vers les récompenses immédiates lors de choix intertemporels, comparativement à des participants ayant réalisés des versions peu exigeantes des mêmes tâches (Blain et al., 2016). Ces résultats suggèrent que la fatigue mentale ne se limite

pas à une dégradation des capacités attentionnelles ou exécutives, mais altère également les processus motivationnels qui orientent nos choix (Blain et al., 2016).

2.2.3. Mesures

La fatigue mentale peut être appréhendée à travers des mesures subjectives, comportementales et physiologiques. Les outils les plus couramment utilisés sont des échelles auto-administrées telles que les Échelles Visuelles Analogiques, qui sont des échelles de mesure subjective, (Visual Analogue Scales, VAS) ou le NASA-TLX, qui permettent d'évaluer la perception de la charge cognitive et de l'effort mental pendant une tâche (Delliaux et al., 2019; Jin et al., 2024). Ces échelles, administrées à différents temps de mesure, permettent d'apprécier l'évolution de la fatigue perçue, c'est-à-dire de la fatigue d'état. Des questionnaires évaluant la fatigue de trait, comme le Multidimensional Fatigue Inventory (MFI), permettent quant à eux d'objectiver un niveau de fatigue global sur une période prolongée.

En situation de tâche cognitive, des indicateurs comportementaux tels qu'une augmentation des temps de réaction, un accroissement du nombre d'erreurs ou une diminution de la vigilance sont souvent utilisés comme mesures objectives de la fatigue mentale. Cependant, la littérature souligne que la corrélation entre les mesures subjectives et la performance cognitive est loin d'être systématique. Un individu peut présenter une baisse de performance sans déclarer de fatigue perçue élevée, et inversement (Benoit et al., 2019; Phillips, 2015). Dès lors, il peut être pertinent de combiner ces mesures avec des marqueurs physiologiques afin d'obtenir une évaluation plus complète et fiable de l'état de fatigue mentale.

Certains marqueurs physiologiques, comme la VFC et/ou l'activité électrique du cerveau enregistrée via l'EEG sont également utilisés pour objectiver un état de fatigue mentale (Csathó et al., 2024; Delliaux et al., 2019; Mao et al., 2026; Wascher et al., 2014). Plus précisément, des auteurs ont montré que la fatigue mentale s'accompagne d'une augmentation progressive de l'activité thêta au niveau frontal (frontal theta power) et que ce marqueur était positivement corrélé au temps passé sur la tâche et à l'augmentation des erreurs comportementales (Wascher et al., 2014). Cette activité thêta frontale est considérée comme un indicateur fiable de l'effort cognitif requis pour maintenir la performance malgré la fatigue (Wascher et al., 2014). Par ailleurs, des travaux récents ont mis en évidence l'utilité de la vitesse de constriction et de dilatation pupillaire (pupil response speed) comme autre marqueur objectif

de la fatigue mentale. Chez des sujets sains, plusieurs études ont montré qu'une tâche cognitive prolongée entraîne une diminution progressive du diamètre pupillaire de base ainsi que de la dilatation pupillaire de pointe, impliquant une modulation des activités sympathique et parasympathique (Bafna & Hansen, 2021). Dans une étude réalisée auprès de personnes atteintes de sclérose en plaques, une diminution significative de cette vitesse a été observée au fil d'une tâche cognitive prolongée, traduisant une altération de la régulation autonome liée à la fatigue (Guillemin et al., 2022). Ces observations illustrent la capacité des marqueurs pupillaires à capter les modifications de l'activité autonome induites par la fatigue mentale.

2.3 Fatigue physique

2.3.1. Définition

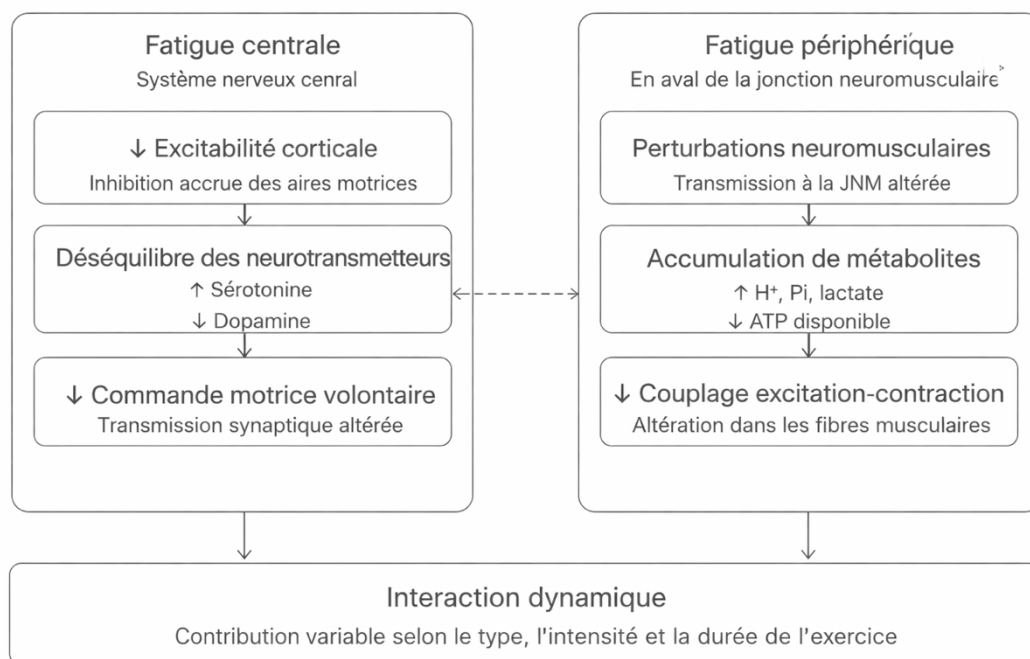
La fatigue physique est une diminution de la capacité à produire ou à maintenir une force, une puissance ou une performance au cours d'une activité physique (Boyas & Guével, 2011; Millet et al., 2023). Elle est décrite comme une réduction transitoire de la fonction physique ou musculaire, pouvant survenir lors ou après un exercice, et qui limite la réalisation de la tâche (Pageaux & Lepers, 2016). Cette fatigue peut s'exprimer par une sensation de lassitude physique, un essoufflement accru, ou une difficulté à maintenir l'intensité d'un effort, même habituel (Millet et al., 2023). Sur le plan comportemental, la fatigue se manifeste également par une diminution de la force maximale volontaire (MVC). Sur le plan physiologique, elle s'accompagne d'une augmentation de la fréquence cardiaque, d'une diminution de la VFC reflétant une activation sympathique accrue et un retrait parasympathique (Mongin et al., 2022).

2.3.2. Mécanismes

Dans la littérature, il est courant de distinguer deux grandes origines de la fatigue physique (Boyas & Guével, 2011; Tornero-Aguilera et al., 2022). D'une part, la fatigue centrale fait référence à une diminution progressive de la capacité du système nerveux central à activer volontairement les muscles. Cette altération peut impliquer une diminution de l'excitabilité corticospinale et/ou une inhibition accrue au niveau des aires motrices en raison de modifications dans la transmission synaptique, notamment via une altération du ratio entre certains neurotransmetteurs (par exemple, une augmentation de la sérotonine et une diminution de la dopamine). Ce sont ces altérations, localisées dans le système nerveux central, qui affecteraient la commande motrice volontaire, c'est-à-dire du cerveau vers le muscle

(Gandevia, 2001; Pageaux & Lepers, 2016). D'autre part, la fatigue périphérique concerne les mécanismes situés au niveau ou en aval de la jonction neuromusculaire et est donc directement lié à la sollicitation intense ou répétée d'un groupe musculaire. Elle inclut notamment des perturbations dans la transmission neuromusculaire, une accumulation de métabolites (comme les ions H^+ , le phosphate inorganique ou le lactate), une réduction de la disponibilité énergétique (notamment en ATP) et une altération des mécanismes de couplage excitation-contraction dans les fibres musculaires (Carroll et al., 2017; Pageaux & Lepers, 2016). Ces deux composantes, centrale et périphérique, interagissent dynamiquement et leur contribution respective dépend du type, de l'intensité et de la durée de l'exercice réalisé (voir figure 1).

Figure 1. Distinction fatigue centrale – fatigue périphérique



2.3.3. Mesures

La fatigue physique peut également être appréhendée à travers des mesures subjectives. Bien que l'échelle de Borg évalue la perception de l'effort (voir section 4.3. Matériel) plutôt que la fatigue en tant que telle, elle y est étroitement liée : à mesure que la fatigue s'installe, l'effort perçu pour maintenir une même intensité d'exercice tend à augmenter (Scherr et al., 2013).

L'évaluation de la fatigue physique s'appuie principalement sur des mesures objectives de performance musculaire, telles que la perte de force maximale volontaire, la diminution du temps jusqu'à l'épuisement lors d'un exercice, ou la baisse de la puissance produite (Boyas & Guével, 2011; Millet et al., 2023; Pageaux & Lepers, 2016).

En complément, des mesures physiologiques telles que la fréquence cardiaque, la lactatémie, constitue un indicateur clé de la sollicitation métabolique induite par l'exercice physique en permettant d'objectiver l'intensité de l'effort et l'accumulation de fatigue physique. La VFC permet également de suivre la réponse du système nerveux autonome à l'effort et l'intensité de la fatigue physique (Besson et al., 2020; Delliaux et al., 2019). En effet, le système nerveux autonome (SNA) intervient dans la régulation de l'homéostasie pendant l'effort physique, notamment par l'activation de sa branche sympathique permettant d'augmenter le débit cardiaque, la ventilation et la libération d'énergie. Toutefois, une activation prolongée ou excessive de cette branche est associée à l'installation progressive de la fatigue physique (Tornero-Aguilera et al., 2022).

2.4 Liens entre la fatigue physique et la fatigue mentale

La fatigue mentale et la fatigue physique entretiennent des relations étroites et peuvent s'influencer mutuellement (Jin et al., 2024; Marcora et al., 2009; Van Cutsem et al., 2017). Pourtant, si la distinction conceptuelle entre ces deux formes de fatigue est utile sur le plan théorique, elle ne reflète pas fidèlement la réalité des contextes sportifs et professionnels. En effet, la fatigue mentale et la fatigue physique sont des phénomènes concomitants dans la majorité des situations (Jin et al., 2024; Marcora et al., 2009; Van Cutsem et al., 2017). Par exemple, un joueur de basketball en fin de match accumule une fatigue musculaire importante tout en devant continuer à prendre des décisions tactiques rapides sous pression. Leurs effets combinés restent néanmoins encore peu documentés, il paraît alors pertinent d'imaginer qu'ils pourraient différer de ceux observés lors d'inductions isolées.

2.4.1. Influence de la fatigue mentale sur les performances physiques

Plusieurs études ont montré que l'induction préalable d'un état de fatigue mentale altère la performance physique, en particulier lors de tâches d'endurance administrées après induction de fatigue (Marcora et al., 2009; Van Cutsem et al., 2017). Ce phénomène ne s'expliquerait pas

par une altération des paramètres physiologiques classiques tels que la fréquence cardiaque ou le taux de lactate, mais par une augmentation de la perception de l'effort pendant l'activité physique, et serait donc en lien avec le modèle de prise de décision basé sur l'effort (Marcora et al., 2009; Smith et al., 2016; Van Cutsem et al., 2017). Cette perception accrue de l'effort, induite par la fatigue mentale, peut entraîner un déséquilibre entre le coût perçu de l'effort et les bénéfices attendus. L'article de Marcora et al. (2009) montre que la fatigue mentale réduit significativement les performances physiques en endurance. Après 90 minutes de tâche cognitive exigeante, les participants présentent une diminution du temps jusqu'à l'épuisement lors d'un exercice de cyclisme intense, sans altération des paramètres physiologiques (cardio-respiratoires, métaboliques ou musculaires). Cette baisse de performance est attribuée à une perception de l'effort plus élevée, les sujets mentalement fatigués atteignant plus rapidement leur seuil d'effort maximal perçu. En revanche, à l'inverse des efforts d'endurance, les performances nécessitant un effort anaérobie maximal et bref (comme la force maximale, les sauts explosifs ou les sprints courts) ne sont généralement pas affectées par la fatigue mentale (Brown et al., 2020; Van Cutsem et al., 2017).

De plus, plusieurs hypothèses neurologiques tentent d'expliquer comment le cerveau limite les performances physiques lorsqu'il est fatigué par un effort mental. L'une des explications classiques repose sur l'hypothèse de l'adénosine (Pageaux & Lepers, 2016). Selon ce modèle, l'effort cognitif prolongé augmenterait le métabolisme neuronal, ce qui pourrait entraîner une accumulation d'adénosine extracellulaire dans certaines régions du cerveau. L'adénosine est un neuromodulateur inhibiteur qui bloque la libération de dopamine, un neurotransmetteur notamment à la motivation et à la récompense. Cette dynamique augmenterait donc la perception de l'effort et réduirait la motivation, et donc la performance (Brown et al., 2020; Pageaux & Lepers, 2016). Cependant, cette hypothèse doit être interprétée prudemment. En effet, elle est déduite de manière indirecte, sur base d'une étude mettant en évidence les effets de la caféine (Azevedo et al., 2016). La caféine, en bloquant les récepteurs à l'adénosine, permet de réduire la fatigue mentale, ce qui a conduit les chercheurs à suspecter le rôle de ce neuromodulateur. Pour autant, aucune étude n'a encore démontré chez l'humain que l'effort mental augmentait la quantité d'adénosine cérébrale de façon proportionnelle à la fatigue. Cette perspective doit donc être relativisée. Comme précisé précédemment, des découvertes plus récentes ont mis en évidence de façon plus directe qu'un effort cognitif prolongé provoque une accumulation de glutamate au niveau du cortex préfrontal (Wiehler et

al., 2022). Nous pourrions alors émettre l'hypothèse que le glutamate joue un rôle dans la baisse de performance physique. Cependant, peu d'articles se sont penchés sur la question.

2.4.2. Influence de la fatigue physique sur les performances cognitives

À l'inverse de la section précédente, cette section va se pencher sur les influences et les effets de la fatigue induite par de l'activité physique sur les performances cognitives. L'influence de la fatigue physique sur ces dernières est un phénomène complexe qui dépend de plusieurs facteurs comme le type de tâche cognitive, l'intensité de l'effort ou encore la condition physique de l'individu (Jin et al., 2024; Labelle et al., 2013).

La fatigue physique peut renforcer la sensation de fatigue mentale et nuire aux performances cognitives, affectant notamment la mémoire de travail, la rapidité de traitement et l'attention soutenue (Jin et al., 2024). Concernant les performances, Labelle et al (2013) ont montré qu'un exercice cardiovasculaire de haute intensité (80 % de la puissance maximale) perturbait les performances des participants lors d'une tâche cognitive subséquente. Plus précisément, les auteurs ont observé une augmentation des erreurs dans les conditions impliquant un changement de consigne lors d'une tâche de Stroop modifiée (Labelle et al., 2013).

Par ailleurs, les effets de l'activité physique sur la cognition, et tout particulièrement sur le contrôle exécutif, ne sont pas linéaires et dépendent de la charge physique. Des recherches ont montré que l'influence de l'effort et de la fatigue physique sur les performances cognitives repose sur un compromis d'allocation des ressources neurales, qui est modélisé par la théorie de l'hypo frontalité par activation réticulée (RAH) (Dietrich & Audiffren, 2011; Labelle et al., 2013). Selon cette théorie, l'exercice aigu déclenche l'activation des systèmes d'éveil de la formation réticulée, qui jouent un rôle central dans les états de vigilance et facilitent par ailleurs les processus cognitifs implicites et automatisés. Dans cette condition, cette activation se traduirait par une amélioration des temps de réaction et des tâches décisionnelles simples (Dietrich & Audiffren, 2011). En revanche, le maintien d'une activité motrice prolongée représenterait un coût computationnel élevé pour le cerveau, le contraignant à redistribuer ses ressources métaboliques limitées (Dietrich & Audiffren, 2011). Cela aurait pour conséquence une désactivation transitoire du cortex préfrontal au profit des zones motrices et autonomes (Dietrich & Audiffren, 2011). Par conséquent, les fonctions exécutives explicites, comme la flexibilité mentale, la planification, la prise de décision complexe ou le traitement de règles

multiples subissent une détérioration significative qui s'accroît proportionnellement avec l'intensité et la durée de l'effort physique (Dietrich & Audiffren, 2011; Labelle et al., 2013). Ce déclin exécutif est toutefois modéré par la condition physique de l'individu. En effet, les sujets plus entraînés démontrent une meilleure stabilité de leurs temps de réponse et une altération plus faible de leurs fonctions préfrontales lors d'exercices à haute intensité (Dietrich & Audiffren, 2011; Labelle et al., 2013).

Ces interactions suggèrent l'existence de mécanismes psychophysiologiques partagés entre fatigue mentale et fatigue physique.

2.5 La Variabilité de la Fréquence cardiaque (VFC)

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) est définie comme la variation des intervalles de temps entre deux battements cardiaques consécutifs (intervalles R-R), typiquement mesurée à partir de l'électrocardiogramme (voir Figure 2) (Perna et al., 2020). La VFC résulte d'interactions bidirectionnelles entre le cœur et le cerveau, impliquant des voies ascendantes (afférentes) et descendantes (efférentes) du système nerveux autonome (Shaffer & Ginsberg, 2017). Les afférences cardiaques, véhiculées notamment par le nerf vague, transmettent en continu des informations physiologiques au cerveau (bottom-up), et influencent l'activité de structures centrales impliquées dans la régulation des émotions, de la cognition et du stress, telle que le cortex préfrontal ventromédian, l'amygdale ou l'insula. En retour, ces structures exercent un contrôle top-down sur le rythme cardiaque via les voies efférentes parasympathiques et sympathiques, ajustant ainsi la VFC en fonction des exigences environnementales ou des états internes (voir figure 3) (Thayer & Lane, 2009). La VFC est ainsi influencée par divers facteurs physiologiques tels que la thermorégulation, le système hormonal ou encore le métabolisme (Shaffer & Ginsberg, 2017). Par ailleurs, la VFC est largement utilisée comme biomarqueur de la dynamique du système nerveux autonome (SNA), car elle reflète l'équilibre entre les branches sympathique et parasympathique du SNA. Autrement dit, elle représente la flexibilité du système cardiovasculaire à faire face à des défis physiques ou psychologiques (Perna et al., 2020).

Plusieurs auteurs considèrent que la VFC est un marqueur non invasif et sensible de la régulation autonome (Csathó et al., 2024; Delliaux et al., 2019). En effet, même si l'électrocardiogramme demeure la méthode de référence permettant l'enregistrement du complexe QRS complet, les mesures de VFC sont facilement accessibles via l'utilisation de montres connectées, ceintures cardiaques, etc., via lesquelles plusieurs indices peuvent être dérivés (Besson et al., 2020; Perna et al., 2020). Bien que ces dispositifs portables ne capturent pas la totalité du signal électrocardiographique, certains d'entre eux, comme les ceintures thoraciques, présentent une forte concordance avec l'ECG, validant leur utilisation pour la quantification de la VFC (Chung et al., 2026; Schaffarczyk et al., 2022).

Figure 2. Illustration variation de la fréquence cardiaque

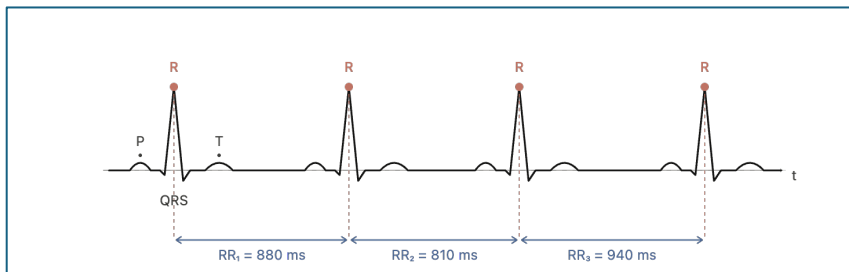
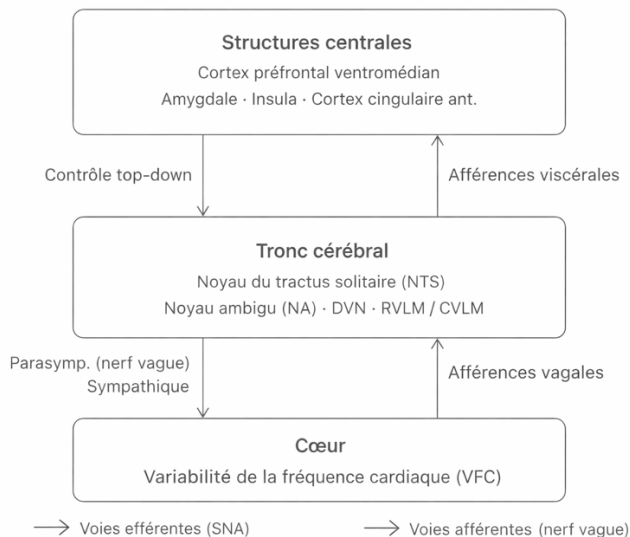


Figure 3 Illustration des voies afférentes et efférentes SNA



2.5.1. Mesure de la VFC

Les méthodes de quantification de la VFC sont généralement classées en indices temporels, indices fréquentiels et indices non linéaires et capturent chacun un aspect différent du signal (Besson et al., 2020; Csathó et al., 2024; Delliaux et al., 2019; Shaffer & Ginsberg, 2017).

Le domaine temporel renseigne sur la quantité de variabilité des mesures de l'intervalle inter battement (IBI), c'est-à-dire la période entre deux battements cardiaques successifs (Shaffer & Ginsberg, 2017). Parmi les indices temporels, le **Root Mean Square of Successive Differences (RMSSD)** a été retenu. Il correspond à la mesure de la variance à court terme des intervalles inter-battements, couramment utilisée pour évaluer l'activité nerveuse parasympathique. Cet indice est largement utilisé pour l'évaluation de la fatigue, car il reflète principalement l'activité parasympathique et est peu sensible aux variations de la fréquence respiratoire, au bruit et aux variations journalières (Besson et al., 2020). Plusieurs auteurs indiquent que le RMSSD sur un enregistrement court (5 minutes) est un marqueur robuste et pratique pour le suivi de la fatigue aiguë ou chronique (Csathó et al., 2024; Delliaux et al., 2019).

Le domaine fréquentiel quant à lui décompose ces intervalles, par le biais d'une transformation de Fourier, en plusieurs bandes de fréquences, des ultra-basses aux hautes fréquences, correspondant chacune à des mécanismes de régulation distincts. Il informe principalement sur la balance entre les influences sympathique et parasympathique (Besson et al., 2020; Shaffer & Ginsberg, 2017). Parmi les indices fréquentiels, la **bande basse fréquence (LF, 0.04–0.15 Hz)** est identifié comme l'indice le plus sensible à l'évolution de la fatigue mentale, avec une augmentation significative observée lors de tâches prolongées (Csathó et al., 2024). La LF a montré un effet du temps sur la tâche plus systématique que la bande haute fréquence (HF) (Csathó et al., 2024). En effet, la HF, qui reflète aussi l'influence vagale, c'est-à-dire l'activité du système nerveux parasympathique, donne des résultats plus variables et est fortement influencée par la respiration (Besson et al., 2020; Csathó et al., 2024).

Plusieurs travaux recommandent de combiner les indices temporels (comme le RMSSD) et fréquentiels (comme la LF), car leur interprétation conjointe améliore la fiabilité de l'analyse de la VFC dans le contexte de la fatigue (Besson et al., 2020; Csathó et al., 2024). En outre, un autre indice fréquentiel a traditionnellement été utilisé pour quantifier la balance sympatho-

vagale, c'est-à-dire l'équilibre entre l'activité du système nerveux sympathique et parasympathique : le **ratio LF/HF** (Shaffer & Ginsberg, 2017). Cependant, l'utilisation du rapport LF/HF est considérée comme peu fiable et son interprétation, comme reflet de l'équilibre sympatho-vagal, est remise en cause (Besson et al., 2020; Csathó et al., 2024).

Enfin, le domaine non linéaire caractérise quant à lui la complexité et l'imprévisibilité de la dynamique cardiaque. En effet, les fluctuations d'un cœur sain ne sont pas linéaires et relèvent du chaos mathématique. Contrairement aux indices linéaires, il rend compte de la nature chaotique des signaux biologiques, s'appuyant sur des outils comme le graphique de Poincaré (indices SD1 et SD2) ou les mesures d'entropie (ApEn, SampEn). En d'autres termes, ces indices permettent d'évaluer le degré d'irrégularité, de variabilité et d'adaptabilité du système cardiovasculaire, en estimant dans quelle mesure les battements cardiaques demeurent imprévisibles tout en conservant une organisation dynamique. En conséquence, il est donc raisonnable de postuler que les fluctuations cardiaques ne peuvent donc pas être complètement décrites par les domaines temporels et fréquentiels (Mao et al., 2026; Shaffer & Ginsberg, 2017). Parmi les indices non linéaires, **SampEn** (entropie d'échantillon) a été retenu. Cet indice permet de quantifier la régularité et la complexité d'une série temporelle d'intervalle R-R. Ici, une valeur élevée indique un signal complexe et peu prévisible, ce qui traduit une dynamique physiologique riche et flexible tandis qu'une valeur faible indique un signal plus régulier et prédictible (Shaffer & Ginsberg, 2017). Contrairement aux domaines temporels et fréquentiels, le SampEn capture des propriétés non linéaires du rythme cardiaque et serait sensible à l'activité cognitive (Mao et al., 2026). En effet, de récents travaux ont montré que le SampEn augmente significativement lors de tâches mentales, pendant que les indices linéaires ne présentent aucun changement notable. En revanche, la SampEn diminue significativement lors de tâches physiques, reflétant la simplification de la dynamique cardiaque sous dominance sympathique (Mao et al., 2026). Ces réponses opposées entre tâches mentales et physiques suggèrent donc que cet indice détecte des aspects de l'interaction cœur-cerveau qui échappent aux mesures linéaires classiques. Un récapitulatif de toutes ces mesures (temporelles, fréquentielles et non-linéaire) est détaillé dans le Tableau 1.

En résumé, la littérature récente indique que le **RMSSD** (temporel), la **bande Co** (fréquentiel) et le **SampEn** (non-linéaire), semblent être des indices pertinents pour l'évaluation de la fatigue dans le contexte de cette étude. Un récapitulatif de ces mesures est détaillé dans le Tableau 2.

Tableau 1. Résumé des différents indices de VFC

Domaine d'analyse	Indicateurs clés	Description et application	Focus principal
Domaine temporel	RMSSD, pNN50	SDNN, Quantifie la variabilité des intervalles de temps entre battements cardiaques successifs (intervalles R-R).	Amplitude de la variabilité
Domaine fréquentiel	LF, HF, LF / HF	Décompose les oscillations du rythme cardiaque en bandes de fréquences et informe sur la balance orthosympathique et parasympathique.	Balance sympatho-vagale
Domaine non-linéaire	D2, ApEn, SampEn	Quantifie l'imprévisibilité, la complexité et la dynamique d'une série d'intervalles R-R.	Complexité et imprévisibilité

Tableau 2. Indices retenus dans le cadre de l'étude

Domaine	Indice	Signification physiologique
Temporel	RMSSD	Variabilité à court terme, activité parasympathique vagale
Fréquentiel	LF (0.04–0.15 Hz)	Oscillations lentes (~0,1 Hz), baroréflexe, mixte ortho-/parasympathique.
Non linéaire	Sampen	Complexité du signal cardiaque

2.5.2. Evolution de la VFC

2.5.2.1. Evolution dans la fatigue mentale

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) émerge comme un indicateur physiologique de la fatigue mentale, car l'effort cognitif prolongé entraîne des modifications autonomes détectables via la VFC (Csathó et al., 2024). En effet, la quasi-totalité des études incluses dans la revue systématique de Csathó et al. (2024) ont rapporté des changements significatifs de la VFC avec l'augmentation du temps passé sur la tâche, faisant de celle-ci un marqueur fiable de la fatigue cognitive induite par le temps passé sur la tâche (time-on-task).

Parmi les indices analysés, la composante en basse fréquence (LF) du spectre et l'indice temporel RMSSD figurent parmi les plus consistants. Toutefois, ces résultats ne sont pas homogènes dans la littérature. Par exemple, ceux-ci ont montré une tendance à augmenter lors de tâches prolongées (50 à 182 minutes), suggérant une activation vagale accrue dans l'étude de Csathó et al. (2024). Cette augmentation de la VFC (RMSSD, LF) pourrait refléter un désengagement progressif de la tâche et une restauration du tonus parasympathique, due notamment à la durée élevée de la tâche (Csathó et al., 2024). Delliaux et al. (2019) ont, quant à eux, observé au cours d'une tâche de 60 minutes induisant une charge mentale importante, une diminution marquée de ces indices dès les premières minutes. Ils ont aussi montré une diminution de l'indice non linéaire D2 (dimension de corrélation). Cette baisse initiale a été suivie d'un retour progressif des paramètres à des valeurs proches de la ligne de base, à l'exception du D2 qui est resté significativement diminué jusqu'à la fin de la tâche, témoignant d'une réduction de la complexité des dynamiques cardiaques sous charge mentale soutenue. Dans une perspective similaire, Mao et al. (2026) rapportent en revanche une augmentation significative des indices non-linéaires de complexité, lors de tâches cognitives, alors que les indices temporels et fréquentiels conventionnels ne présentaient aucun changement notable dans ces mêmes conditions. Plus précisément, les auteurs ont examiné et comparé l'évolution d'indices non-linéaires, notamment le SampEn, lors de tâche cognitives ou physiques. Les résultats ont montré que les valeurs du SampEn avaient des évolutions opposées en fonction du type de fatigue induite : elles augmentaient en tâche mentale et diminuaient en tâche physique. Plus précisément, la diminution en tâche physique était attribuée à une simplification de la VFC due à une activité sympathique plus importante et un retrait parasympathique, alors que l'augmentation en tâche cognitive devait refléter l'activité cérébrale. En effet, l'hypothèse des

chercheurs était que cette hausse était due aux interactions complexes et dynamiques de différents réseaux cérébraux, ce qui générerait un niveau de complexité similaire à un phénomène de « chaos », qui se répercute sur le SNA, et donc sur la VFC (Mao et al., 2026). Toutes ces divergences empiriques illustrent l'absence de consensus clair sur la direction des changements de la VFC en condition de fatigue mentale.

Par ailleurs, Perna et al. (2020) soutiennent que la VFC, et en particulier ses composantes vagales, peut refléter la flexibilité adaptative de l'individu face à un stress cognitif. Cette perspective repose sur le rôle central de l'innervation vagale dans la régulation des réponses psychophysiologiques, émotionnelles et attentionnelles. Le nerf vague constitue la voie principale par laquelle les signaux cardiaques afférents atteignent les structures cérébrales impliquées dans la régulation émotionnelle et cognitive, tout en assurant un contrôle parasympathique descendant sur le rythme cardiaque (Shaffer & Ginsberg, 2017; Thayer & Lane, 2009). Ainsi, une VFC élevée serait associée à une meilleure résilience mentale, une modulation plus efficace du stress, et une capacité accrue à mobiliser les ressources cognitives en situation exigeante (Perna et al., 2020). Cette approche ouvre la voie à une lecture plus intégrative des indices de VFC, non seulement comme marqueurs passifs de l'état de fatigue, mais aussi comme reflets dynamiques des capacités d'adaptation mentales de l'individu (Perna et al., 2020). Ainsi, bien que la VFC offre des perspectives intéressantes comme biomarqueur de la fatigue mentale, son interprétation nécessite une approche intégrative, combinant différents indices (temporels, fréquentiels, non linéaires) et des mesures complémentaires pour en assurer la validité écologique et théorique.

2.5.2.2. Évolution dans la fatigue physique

Lors d'un effort physique, la VFC tend à diminuer progressivement à mesure que l'intensité ou la durée de l'exercice augmente (Brockmann & Hunt, 2023). Cette diminution traduit principalement un retrait de l'influence parasympathique (vagale) au profit d'une activation sympathique accrue (Besson et al., 2020; Thayer & Lane, 2009). Les indices temporels, comme le RMSSD, chutent significativement avec l'intensification de l'exercice (Mongin et al., 2022). Du côté fréquentiel, on observe une réduction des bandes LF et HF, les valeurs HF étant particulièrement sensibles à la baisse de l'activité vagale (Brockmann & Hunt, 2023; Cottin et al., 2004). Ainsi, la VFC devient de plus en plus faible, voire quasi nulle à haute intensité, notamment après le seuil ventilatoire, où la régulation cardiaque est dominée par des mécanismes non neuronaux (Cottin et al., 2004). Cette évolution est un indicateur robuste du

niveau de stress physiologique induit par l'exercice et constitue un marqueur pertinent pour évaluer la fatigue physique en temps réel. Un récapitulatif de l'évolution des différents domaines de VFC est disponible dans le Tableau 3.

Tableau 3. Évolution des différents domaines de VFC

Indices VFC	Évolution avec l'effort physique	Évolution avec l'effort mental
Temporels	Diminuent significativement avec l'intensification de l'exercice	Résultats contradictoires : augmentent dans certaines études (Csathó et al., 2024), diminuent dans d'autres (Perna et al., 2020; Shaffer & Ginsberg, 2017) ou restent inchangés (Mao et al., 2026).
Fréquentiels	Diminuent significativement avec l'intensification de l'exercice	Résultats contradictoires : augmentent dans certaines études (Csathó et al., 2024), diminuent dans d'autres (Perna et al., 2020; Shaffer & Ginsberg, 2017) ou restent inchangés (Mao et al., 2026).
Non-linéaires	Diminuent significativement avec l'intensification de l'exercice	Augmentent dans certaines études (Csathó et al., 2024; Delliaux et al., 2019; Mao et al., 2026)

2.6 Lacunes dans la littérature

La majorité des travaux portant sur le lien entre les différents types de fatigue se sont concentrés sur l'étude isolée de la fatigue mentale ou de la fatigue physique, en examinant leurs effets respectifs sur certains marqueurs physiologiques. Cependant, il existe relativement peu d'études ayant investigué les effets d'une induction combinée de fatigue mentale et physique, en particulier sur la VFC et les mécanismes d'interaction possibles entre ces deux types de fatigue. Or, dans les contextes réels, tels que les environnements sportifs par exemple, les individus sont fréquemment exposés simultanément à des sollicitations cognitives et physiques. Chen et al. (2023) ont comparé les effets de la fatigue physique, mentale et combinée sur la VFC chez des individus physiquement actifs. Contrairement à ce que l'on pourrait attendre d'un effet cumulatif ou synergique, la fatigue combinée ne se distinguait pas (Chen et al., 2023). Par ailleurs, les études ayant examiné l'impact de la fatigue mentale sur la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) semblent rapporter des résultats hétérogènes. Ces divergences limitent la compréhension des mécanismes autonomes sous-jacents à la fatigue mentale et renforcent la nécessité de recherches visant à clarifier ces relations, en particulier dans des contextes d'induction combinée.

3. Hypothèses et objectifs principaux

Les sections précédentes ont mis en évidence qu'il existe dans la littérature des divergences entre les différentes études concernant les effets isolés des fatigues physique et mentale sur les capacités physiques et cognitives, respectivement. En outre, les effets de l'induction combinée de fatigue mentale et physique, reflétant pourtant un contexte plus réaliste, ont reçu très peu d'attention.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire, dont l'objectif est d'examiner les effets de cette combinaison et de contribuer à clarifier les divergences observées dans la littérature. Plus précisément, l'objectif est d'examiner les effets d'une induction combinée de fatigue mentale et physique sur l'activité du système nerveux autonome, en comparaison avec une induction isolée de fatigue physique. À cette fin, plusieurs indices de la VFC ont été analysés afin de distinguer les contributions sympathique et parasympathique à la régulation autonome aux aspects physiques et cognitifs de la fatigue.

Afin de répondre à notre question de recherche, 16 participants ont réalisé 2 séances expérimentales distinctes au cours desquelles leur VFC a été analysée.

L'une de ces séances correspondait à une condition de fatigue simple (tâche physique seule), tandis que l'autre consistait en une induction combinée de fatigue physique et mentale. Sur la base de ce protocole, nous formulons les hypothèses suivantes :

- 1) Premièrement, l'activité physique devrait entraîner une diminution des différents indices de VFC.
- 2) Deuxièmement, l'ajout d'une tâche mentale modulerait l'évolution de la VFC.
- 3) Troisièmement, il existerait des corrélations distinctes entre les mesures de la VFC avec l'effort perçu/la fatigue physique et l'effort perçu/la fatigue mentale, selon les contributions sympathique et parasympathique.

Enfin, si une corrélation entre l'effort / la fatigue subjective perçue et la VFC en tâche simple était observée, étant donné que nous nous attendons à une évolution différente de VFC en condition double, une hypothèse exploratoire est formulée :

- La corrélation entre la VFC et l'effort subjectif perçu serait plus faible lors d'induction combinée de fatigue physique et mentale, comparativement à celle observée en condition de fatigue physique simple.

4. Méthode

Tout d'abord, il est à préciser que ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche plus large visant à examiner l'impact réciproque de la fatigue mentale et de la fatigue physique sur les performances cognitives et physiques. Ainsi ce projet dans sa globalité repose sur l'hypothèse selon laquelle ces deux formes de fatigue pourraient interagir et s'influencer mutuellement (Van Cutsem et al., 2017), notamment lorsqu'elles sont induites simultanément.

Cette section décrit la méthodologie mise en place. Elle détaille l'échantillon, le matériel utilisé et la procédure expérimentale adoptée. Toutefois, étant donné que le présent mémoire se focalise uniquement sur un sous-ensemble de mesures, certains aspects de l'expérience globale ne seront pas développés. Nous référons le lecteur intéressé aux autres mémoires portant sur le projet.

4.1 Participant

L'étude globale est composée d'un échantillon initial de 80 participants, recrutés via les réseaux sociaux, le bouche à oreille et les plateformes universitaires. Néanmoins, l'appareil permettant d'enregistrer la VFC a été intégré au projet en cours de route et ces données n'ont donc été acquises que pour 40 participants. Par ailleurs, dans le cadre de ce travail, un sous-échantillon spécifique de 20 participants a été analysé (voir section ci-dessous), ce qui ramène la taille de l'échantillon à 20 participants. Sur l'ensemble de ces participants, les données de 4 d'entre eux se sont avérées inexploitables, ramenant ainsi la taille d'échantillon finale à $N = 16$. Les caractéristiques démographiques de l'échantillon finale sont décrites dans le tableau 4.

En ce qui concerne les critères d'inclusion, les participants devaient être âgés de 18 à 30 ans, être en bonne santé générale et avoir comme langue maternelle le français. Ils devaient également présenter un niveau d'entraînement modéré, c'est-à-dire ne devaient ni être des sportifs professionnels ou soumis à des entraînements intensifs et réguliers, ni sédentaires (entre 2 et 10 heures de sport par semaine). Enfin, les participants pouvaient être de sexe féminin ou masculin.

En ce qui concerne les critères d'exclusion, étaient exclus tous les participants présentant des antécédents de traumatisme crânien, des troubles neurologiques ou psychiatriques diagnostiqués, des troubles moteurs, ainsi que toute pathologie susceptible d'interférer avec les performances cognitives, physiques ou physiologiques, notamment les troubles respiratoires tels que l'asthme. Les participants présentant une consommation abusive de substances psychoactives ou prenant une médication pouvant influencer la fatigue, la motivation ou les performances cognitives (anxiolytiques, antidépresseurs, etc.) étaient également exclus.

Tableau 4. Caractéristiques générales des participants

Variables	Échantillon
Nombre total (n)	16
Pourcentage d'homme (%)	56.25 %
Age moyen (SD)	23.63 (1.89)
Nombre d'années d'étude moyen (SD)	15.31 (1,45)
Activité physique moyenne en heure (SD)	4.81 (2.2)
Fréquence cardiaque au repos moyenne	83.63 (9.32)

Légende : définition des variables utilisées : **Nombre d'années d'étude moyen** : nombre d'années d'étude réussies calculé en additionnant les années d'études primaires, secondaires et supérieures. **Activité physique**

moyenne en heure : nombre d'heures d'activité physique pratiquée par semaine. **Fréquence cardiaque au repos moyenne** : fréquence cardiaque prise sur une période de 3 minutes en position assise.

Cette étude a reçu l'approbation du comité d'éthique de la Faculté de Psychologie, Logopédie et des Sciences de l'Éducation de l'Université de Liège (référence du dossier : 2324-126). Chaque participant a signé un formulaire de consentement éclairé et a été informé de la possibilité de mettre fin à sa participation à tout moment, sans justification requise. Dans le but de préserver la validité des résultats et de minimiser les biais potentiels, les objectifs exacts de l'étude ne leur ont pas été divulgués au préalable. Un débriefing leur était alors fourni en fin de participation.

4.2 Design expérimental

Chaque participant a réalisé deux séances d'approximativement une heure. Une séance était consacrée à l'induction de fatigue simple (mentale ou physique ; voir Figure 4) tandis que l'autre séance était consacrée à l'induction combinée de fatigue mentale et physique. Les participants ont ainsi été répartis préalablement, de manière pseudo-aléatoire, en deux groupes distincts : un groupe « mental » et un groupe « physique ». Plus précisément, durant la séance d'induction de fatigue simple, les participants du groupe « mental » étaient donc soumis à une tâche cognitive seule, tandis que les participants du groupe « physique » étaient soumis à une tâche physique seule. Tous les participants ont cependant réalisé une séance impliquant une double tâche cognitive et physique, permettant ainsi l'induction combinée des deux types de fatigue. L'ordre des séances était contrebalancé pour chaque participant.

Le temps entre chacune des séances était limité à maximum 1 semaine et, dans la mesure du possible, les deux séances d'un même participant étaient réalisées aux mêmes heures de la journée afin de limiter l'influence du rythme circadien. Il était par ailleurs demandé aux participants d'éviter toute activité sportive intense dans les 24 heures précédant une séance afin de ne pas biaiser les résultats en provoquant une fatigue physiologique résiduelle aux participants.

4.2.1. Procédure

La procédure, lors d'une séance, se déclinait en trois étapes clés : le recueil de mesures de référence (ou pré-induction de fatigue), l'induction de la fatigue à proprement parler, le recueil des mêmes mesures post-induction de fatigue.

Cette structure permet de suivre précisément l'évolution des variables étudiées en réponse à l'état de fatigue provoqué.

À leur arrivée, les participants prenaient connaissance d'un formulaire d'information présenté et expliqué par l'expérimentateur, puis signaient un formulaire de consentement éclairé. L'expérimentateur procédait ensuite à la pose de deux électrodes : une électrode d'électromyographie de surface (sEMG) placée sur le Rectus Femoris du quadriceps de la jambe directrice, ainsi qu'un capteur positionné au niveau du pelvis. Les données physiologiques et mécaniques recueillies par ces dispositifs ne seront pas traitées dans ce travail. Enfin, une ceinture cardiaque Polar H10 (H10, Polar Electro Oy, Finland) était installée autour du thorax, en dessous de la poitrine des participants. Les mesures physiologiques de fréquence cardiaque et de VFC ont ainsi pu être enregistrées au moyen du logiciel Kubios (Kubios HRV, 4.3.0, Biosignal Analysis and Medical Imaging Group, Kuopio, Finland). La fréquence cardiaque au repos des participants était ensuite mesurée (voir section Matériel) pendant 3 minutes, durant lesquelles ils leur étaient demandé de rester assis dans le calme. Suite à cela, ils étaient invités à pédaler pendant 5 minutes à titre d'échauffement musculaire, durant laquelle il répondait à différentes questions démographiques.

Comme précisé précédemment, des mesures de performances physiques et cognitives étaient mesurées avant et après l'induction de fatigue (simple ou double). Cependant, ces mesures pré – post n'ont pas été analysées dans le cadre de ce mémoire. Une description complète des différentes mesures est disponible dans les autres mémoires portant sur ce sujet. Brièvement, trois épreuves étaient administrées : 10 sauts à hauteur maximale, un test de force isométrique maximale et une tâche attentionnelle de vigilance psychomotrice (PVT).

Après acquisition de ces mesures pré-test, les participants ont réalisé la tâche d'induction de fatigue. Pour rappel, celle-ci différait en fonction : du groupe auquel les participants ont été assignés (mentale ou physique) ainsi que de la séance en cours (condition simple ou condition double).

Lors de la tâche cognitive seule, un état de fatigue mentale était induit au moyen de la tâche « Time Load Dual Back » (TLDB ; voir section matériel), combinant une tâche N-Back et une tâche de jugement de parité. La durée totale de la tâche était de 20 minutes. Afin de reproduire les conditions de la condition combinée, cette tâche était, par ailleurs, effectuée sur un vélo d'appartement.

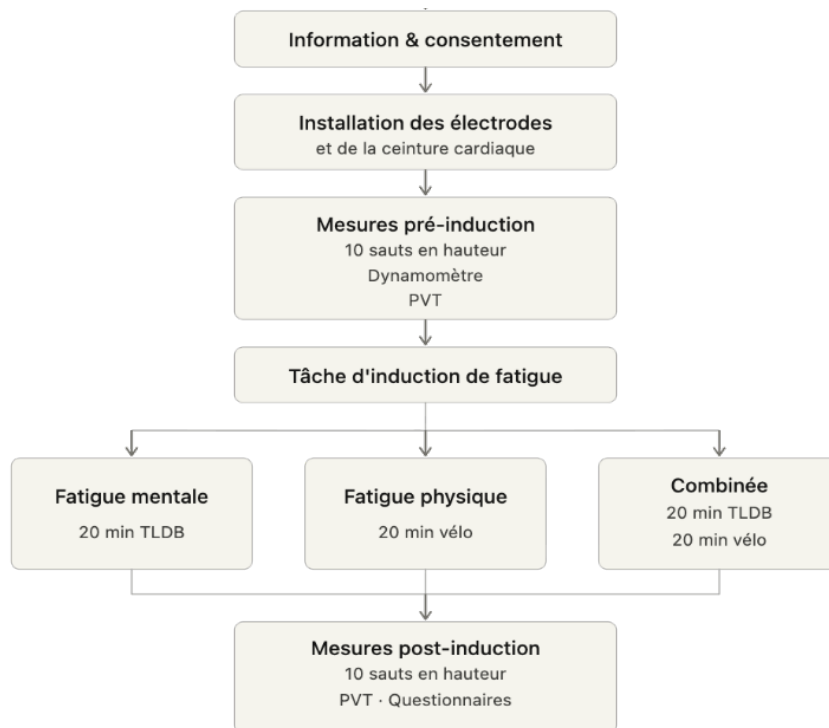
Lors de la tâche physique seule, un état de fatigue physique était induit au moyen d'une session de cyclisme en salle d'une durée de 20 minutes. Préalablement à la tâche, il était demandé aux participants d'adapter la résistance du vélo afin de produire un effort subjectif (RPE) de 14 sur l'échelle de Borg (voir la section matériel). Les participants devaient pédaler tout au long de la tâche de manière constante à une cadence fixée à 70 répétitions par minute (RPM).

Lors de la double tâche mentale et physique, une induction conjointe de fatigue mentale et physique a été réalisée via la réalisation simultanée de la tâche cognitive (TLDB) et de la session de cyclisme en salle. La durée de la double tâche était également de 20 minutes et les conditions d'administrations étaient identiques à celles décrites pour les tâches seules.

Par ailleurs, chaque tâche était divisée en quatre blocs de 5 minutes. Entre chaque bloc, les participants devaient renseigner leur niveau de fatigue mentale et physique ainsi qu'estimer les niveaux d'effort mental et physique produits au fur et à mesure de la tâche sur des échelles visuelles analogiques (VAS ; voir section matériel) allant de 1 à 10. Durant l'entièreté des tâches d'induction de fatigue, la fréquence cardiaque, la VFC ainsi que l'activité musculaire du quadriceps ont été mesurées de façon continue dans chacun des blocs.

Entre les deux séances, les participants étaient invités à compléter, à domicile, plusieurs questionnaires portant sur leur niveau de somnolence et de fatigue au quotidien : le Intrinsic Motivation Inventory (IMI) et le NASA Task Load Index (TLX). Ces outils ne seront pas détaillés dans le présent travail.

Figure 4. Déroulement d'une séance



4.3 Matériel

4.3.1. Time Load Dual Back (TLDB)

La fatigue mentale est induite par l'administration d'une double tâche cognitive, la *Time Load Dual Back* (TLDB), d'une durée de 20 minutes. Des études précédentes ont effectivement montré qu'un état de fatigue mentale pouvait être induit même lors de tâche de courte durée (O'Keeffe et al., 2020). Développée par Borragán et al. (2017), la TLDB consiste en une présentation alternée de lettres et de chiffres, à laquelle les participants répondaient via une manette de console. Ceux-ci devaient, d'une part, indiquer si la lettre présentée était identique à la précédente (similaire à une tâche 1-back) et, d'autre part, déterminer si le chiffre affiché était pair ou impair, en actionnant les boutons correspondants de la manette (voir Figure 5). Les stimuli sont présentés à un rythme constant d'une seconde par item, exigeant ainsi une attention soutenue tout au long de la tâche. La TLDB était réalisée sur un vélo d'appartement et, lors de la condition double, simultanément à une session de cyclisme en salle durant laquelle les participants pédalaient à intensité constante tout en réalisant l'épreuve. Une illustration du setup expérimental est disponible à la Figure 6.

Figure 5. Illustration TLDB

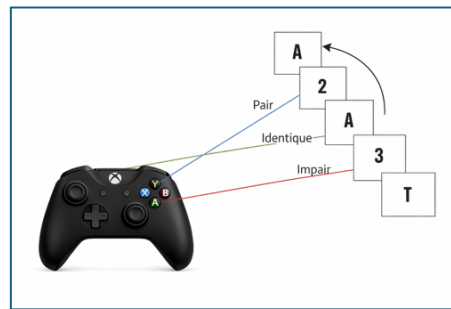
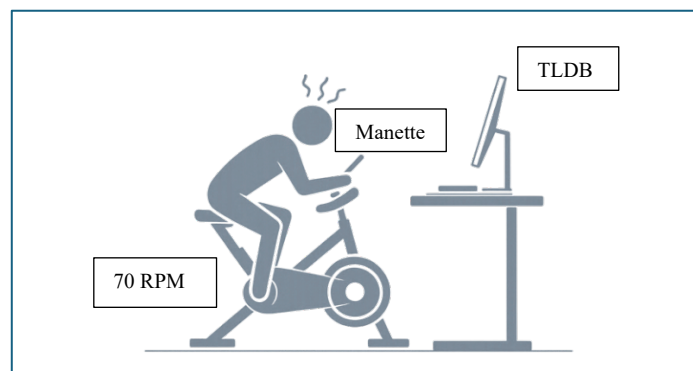


Figure 6. Illustration setup Condition double



4.3.2. Échelle de Borg.

Afin de garantir l'induction d'un état de fatigue physique lors des tâches physiques simple et double, il était demandé aux participants de pédaler avec un effort considéré comme moyennement difficile. Afin d'évaluer cet effort, l'échelle de Borg (1970) leur a été proposée. Cette échelle permet de quantifier de manière objective le niveau d'effort durant un exercice physique. Elle est cotée de 6 (aucun effort) à 20 (effort maximal), ce qui correspond approximativement à la fréquence cardiaque d'un individu en battements par minute multiplié par 10. Un effort moyennement difficile correspond donc à une cote de 14. Plus concrètement, une activité effectuée avec une intensité de 14 représente une activité intense accompagnée d'essoufflement, de l'incapacité à tenir une conversation de façon fluide, d'une augmentation du rythme cardiaque. Selon Scherr et al. (2013), la valeur de 14 correspond au seuil anaérobie individuel, suffisante pour provoquer une fatigue physique progressive au cours des 20 minutes d'effort.

4.3.3. Échelle visuelle analogique (VAS)

Des mesures subjectives de fatigue et d'effort ont été également évaluées durant la phase d'induction.

Toutes les 5 minutes, les tâches étaient interrompues par des échelles visuelles analogiques (VAS) allant de 0 à 10 sur lesquelles les participants devaient indiquer leur niveau de fatigue physique et mentale ainsi qu'estimer les degrés d'effort physique et mental réalisés. Ces mêmes échelles étaient également administrées avant et après chaque tâche en plus d'échelles de somnolence, de motivation, d'ennui et de satiété.

4.3.4. Polar H10

Finalement, la fréquence cardiaque et la VFC des participants ont été enregistrées en continu tout au long des tâches physiques et cognitives à l'aide de la ceinture cardiaque Polar H10 (H10, Polar Electro Oy, Finland). Ce dispositif est un capteur électronique porté autour du buste mesurant l'activité électrique du cœur sous forme d'intervalles inter-battements (intervalles R-R). Recommandée et validée pour l'étude de la physiologie individuelle et interpersonnelle, la Polar H10 présente une forte concordance et un faible biais par rapport à un enregistrement ECG de référence (Chung et al., 2026; Schaffarczyk et al., 2022).

Durant l'acquisition, la ceinture était connectée en temps réel à l'application mobile Kubios HRV, qui assurait la réception et l'enregistrement des intervalles R-R. À l'issue des sessions, les données étaient exportées au format .kdf puis importées dans le logiciel Kubios HRV (Kubios HRV, 4.3.0, Biosignal Analysis and Medical Imaging Group, Kuopio, Finland) pour le traitement et l'extraction des indices. Préalablement à toute analyse, les enregistrements ont fait l'objet d'une correction du signal (« automatic noise detection » : Medium, « Beat correction » : automatic). Des marqueurs temporels ayant été posés en temps réel au cours de l'enregistrement en début et fin de tâche, le signal a été segmenté en fenêtres d'analyse de 5 minutes correspondant chacune à un bloc (Bloc 1 à Bloc 4). Pour chaque fenêtre, plusieurs indices de VFC ont été extraits et moyennés : le RMSSD (domaine temporel), la puissance spectrale LF (domaine fréquentiel) et le SampEn (domaine non-linéaire).

5. Analyse statistique.

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé à l'aide du logiciel JAMOVI (The Jamovi project, 2022). La normalité des résidus a été évaluée pour l'ensemble des variables dépendantes au moyen du test de Shapiro-Wilk, Les résultats de ces vérifications sont disponibles en annexe (voir Annexe 1).

La probabilité de dépassement a été fixée à $p < .05$.

Compte tenu du fait que l'analyse de puissance, a priori, a été réalisée pour l'échantillon global, une analyse de sensibilité, a posteriori, a été réalisée à l'aide du logiciel G*Power afin d'estimer quelle taille d'effet minimale le présent projet est en mesure de détecter sur le sous-échantillon analysé ($N = 16$). En considérant un seuil de signification fixé à $\alpha = .05$, une puissance statistique de $1 - \beta = .80$, une corrélation entre les mesures répétées = $.5$, l'analyse indique que l'étude est en mesure de détecter une taille d'effet de $f = 0.34$, ce qui la situe entre une taille d'effet moyenne ($f = 0.25$) et une taille d'effet élevée ($f = 0.40$) selon les critères de Cohen (Cohen, 1988). Pour ce calcul, afin de tenir compte d'une éventuelle violation de la condition de sphéricité, une correction ϵ de 0.75 a été appliquée.

5.1 Analyse des états subjectifs

Quatre ANOVAs à mesures répétées ont été réalisées, une pour chacune des variables dépendantes suivantes : l'effort mental perçu (EM), l'effort physique perçu (EP), la fatigue mentale perçue (FM) et la fatigue physique perçue (FP), mesurées sur une échelle de 0 à 10 à l'issue de chaque bloc. Bien que les variables de fatigue (FM et FP) aient également été administrées avant la tâche, seuls les quatre blocs réalisés durant la tâche ont été inclus dans les analyses, afin de se concentrer sur l'évolution intra-tâche. Les variables d'effort (EM et EP) n'étant mesurées qu'au cours des quatre blocs, l'ensemble des quatre ANOVAs repose sur le même plan. Le modèle employé était un plan factoriel 2 (Condition : fatigue physique simple vs. double) x 4 (Temps : bloc 1, bloc 2, bloc 3, bloc 4), avec les deux facteurs en intra-sujets. Aucune covariable n'a été incluse dans ces modèles. La sphéricité a été évaluée par le test de Mauchly ; lorsqu'elle n'était pas respectée, la correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée. En cas d'effet significatif, des analyses post-hoc ont été réalisées au moyen de tests t de Student pour échantillons appariés avec correction de Tukey afin de localiser les différences significatives entre les différents niveaux du facteur Temps, ainsi qu'entre les conditions.

5.2 Analyse de la VFC

Trois ANOVAs à mesures répétées ont été réalisées, une pour chacun des indices de VFC retenus : le RMSSD (domaine temporel), le LF (domaine fréquentiel) et le SampEn (domaine non-linéaire). Ces analyses ont été conduites sur le sous-échantillon du groupe physique. Pour chaque indice, le modèle employé était un plan factoriel 2 (Condition : fatigue physique simple vs double) x 4 (Temps : bloc 1, bloc 2, bloc 3, bloc 4), avec les deux facteurs en intra-sujets.

Aucune covariable n'a été incluse. La sphéricité a été évaluée par le test de Mauchly ; lorsqu'elle n'était pas respectée, la correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée. En cas d'effet significatif, des analyses post-hoc avec correction de Tukey ont été réalisées.

5.3 Analyses corrélationnelles

Les analyses corrélationnelles visaient à examiner les associations entre l'évolution des mesures subjectives et celles des indices de VFC, séparément pour la condition physique simple et la condition double. Afin de capturer l'évolution intra-individuelle au cours de la tâche, des scores de changement ont été calculés pour chaque variable. Pour les VAS (EM, EP, FM et FP), des scores delta ont été calculés selon la différence entre le bloc 4 et le bloc 1 ($\Delta = \text{bloc 4} - \text{bloc 1}$). Pour les indices de VFC ayant présenté un effet significatif du facteur Condition dans les analyses de la section 5.2, à savoir le RMSSD et la LF, un pourcentage de changement a en revanche été retenu, selon la formule $\text{pourcentage} = [(\text{bloc 4} - \text{bloc 1}) / \text{bloc 1}] \times 100$. Ce choix s'explique par la forte asymétrie inter-individuelle des valeurs de VFC au bloc 1 (étendue du LF : 0,32 - 43,4 ms), qui rend le delta brut largement déterminé par le niveau de base. Le pourcentage de changement, en standardisant la variation à la valeur initiale propre à chaque participant, neutralise cet effet. Cette transformation n'a pas été appliquée aux VAS, d'une part parce que ces variables sont mesurées sur une échelle bornée 0-10 plus homogène entre sujets au bloc 1, d'autre part parce que le pourcentage n'est pas défini pour les valeurs initiales nulles, observables sur les VAS. Pour les variables subjectives, un delta positif indique une augmentation de la fatigue ou de l'effort perçu au cours de la tâche, tandis qu'un delta négatif reflète une diminution.

Pour les indices de VFC, un pourcentage négatif indique une diminution de la variabilité cardiaque entre le début et la fin de la tâche, tandis qu'un pourcentage positif reflète une augmentation. La normalité des distributions des scores de changement ayant été évaluée au

moyen du test de Shapiro-Wilk et s'étant avérée non respectée (voir annexe 1), des corrélations de Spearman ont été retenues.

Deux matrices de corrélations ont été calculées : l'une sur le sous-échantillon en condition physique simple, l'autre sur ce même sous-échantillon en condition double.

6. Résultats

6.1 États subjectifs (VAS)

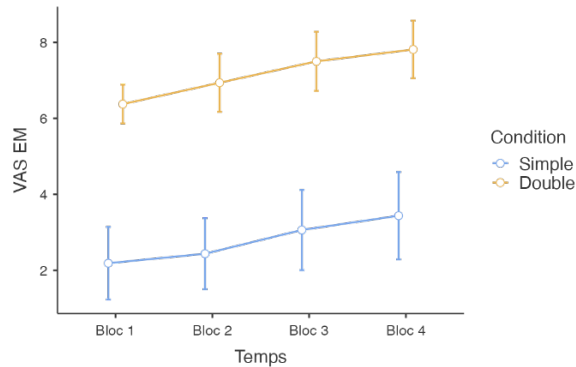
Tableau 5. ANOVA à mesure répétée 2 (condition : simple vs double) x 4 (temps : bloc 1 vs bloc 2 vs bloc 3 vs bloc 4) VAS

Variable	Effet	Somme des carrés	ddl	Carrés moyen	F	p	η^2_p
VAS_EM	Condition	612.500	1	612.500	59.951	<0.001	0.800
	Temps	34.563	1.90	18.235	20.182	<0.001	0.574
	Condition x Temps	0.438	3	0.146	0.276	0.843	0.018
VAS_EP	Condition	0.633	1	0.633	0.0961	0.761	0.006
	Temps	57.711	3	19.237	28.9384	<0.001	0.659
	Condition x Temps	1.336	1.50	0.891	0.5931	0.514	0.038
VAS_FM	Condition	402.6	1	402.570	29.70	<0.001	0.664
	Temps	33.5	3	11.154	14.91	<0.001	0.498
	Condition x Temps	11.1	1.77	6.259	4.31	0.028	0.223
VAS_FP	Condition	0.00781	1	0.00781	0.00154	0.969	0.000
	Temps	84.27344	2.04	41.29730	27.12573	<0.001	0.644
	Condition x Temps	14.89844	1.99	7.50089	6.67561	0.004	0.308

L'analyse de l'effort mental subjectif révèle un effet principal significatif de la condition $F_{(1,15)} = 59.951$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = .800$, indiquant des scores d'effort mental plus élevés en condition double qu'en condition simple. L'analyse indique également un effet principal significatif du temps $F_{(1.90,28.43)} = 20.182$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = .574$. En moyenne, les scores à la VAS EM étaient de $M = 4.28$, IC à 95% [3.70 ; 4.86] au Bloc 1, de $M = 4.69$, IC à 95% [4.09 ; 5.29] au Bloc 2, de $M = 5.28$, IC à 95% [4.64 ; 5.92] au bloc 3 et de $M = 5.63$, IC à 95% [5.04 ; 6.21] au Bloc 4 (voir figure 7). Les analyses post-hoc indiquent que cette progression est significative entre la majorité des blocs consécutifs, à l'exception de la comparaison Bloc 3 - Bloc 4 (pTukey = .142).

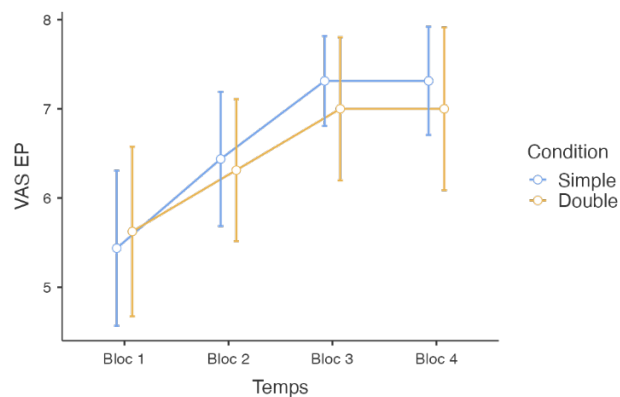
Aucune interaction significative Condition x Temps n'est observée $F_{(3,45)} = 0.276$, $p = .843$, $\eta^2_p = .018$.

Figure 7. Estimation des moyennes marginales de la VAS EM temps*condition



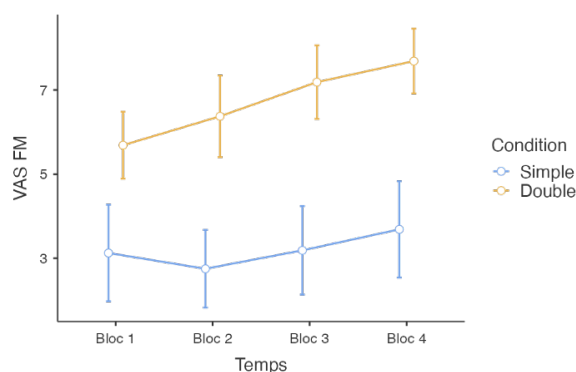
A l'analyse de l'effort physique, aucun effet significatif de la Condition n'est observée $F_{(1,15)} = 0.0961$, $p = .761$, $\eta^2_p = .006$. Un effet principal significatif du temps est observé $F_{(3,45)} = 28.9384$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = .659$. En moyenne, les scores à la VAS EP étaient de $M = 5.53$, IC à 95% [4.81 ; 6.26] au Bloc 1, de $M = 6.38$, IC à 95% [5.83 ; 6.92] au Bloc 2, de $M = 7.16$, IC à 95% [6.71 ; 7.60] au bloc 3 et de $M = 7.16$, IC à 95% [6.70 ; 7.61] au Bloc 4 (voir figure 8). Des analyses post-hoc ont été réalisées. Les résultats suggèrent que les valeurs d'effort physique augmentent de manière significative, jusqu'à atteindre un plafond au bloc 3. En effet, nous n'observons pas de différence entre le Bloc 3 et le Bloc 4 ($p_{\text{Tukey}} = 1.000$). Aucune interaction significative Condition x Temps n'est observée, $F_{(1,50,22,50)} = 0.593$, $p = .514$, $\eta^2_p = .038$.

Figure 8. Estimation des moyennes marginales de la VAS EP temps*condition



L'analyse de la fatigue mentale révèle un effet principal significatif de la Condition $F_{(1,15)} = 29.70$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = .664$, indiquant des scores de fatigue mentale plus élevés en condition double qu'en condition simple. Un effet principal significatif du temps est également observé, $F_{(3,45)} = 14.910$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = .498$. En moyenne, les scores à la VAS FM étaient de $M = 4.41$, IC à 95% [3.77 ; 5.04] au Bloc 1, de $M = 4.56$, IC à 95% [3.92 ; 5.21] au Bloc 2, de $M = 5.19$, IC à 95% [4.64 ; 5.74] au bloc 3 et de $M = 5.69$, IC à 95% [5.09 ; 6.29] au Bloc 4 (voir figure 9). Des analyses post-hoc ont été réalisées. Les résultats indiquent que la fatigue mentale perçue n'évolue que faiblement en début de tâche, avec une comparaison non significative entre le Bloc 1 et Bloc 2 ($p_{\text{Tukey}} = .905$). L'évolution devient toutefois significative entre le Bloc 2 et le Bloc 3 ($p_{\text{Tukey}} = .020$) et entre le bloc 3 et le Bloc 4 ($p_{\text{Tukey}} = .022$). Une interaction significative Condition x Temps est également observée, $F_{(1,77,26.55)} = 4.310$, $p = .028$, $\eta^2_p = .223$. Les analyses post-hoc indiquent que la fatigue mentale subjective augmente significativement entre le Bloc 1 et le Bloc 4 en condition double ($p < .001$), tandis qu'aucune augmentation significative n'est observée en condition simple ($p = .880$).

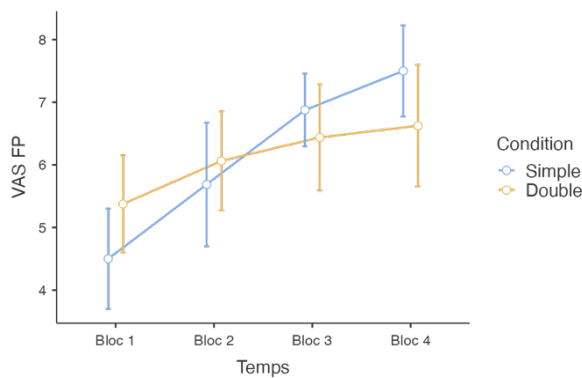
Figure 9. Estimation des moyennes marginales de la VAS FM temps*condition



L'analyse de la fatigue physique subjective n'indique aucun effet de la condition $F_{(1,15)} = 0.002$, $p = .969$, $\eta^2_p = .000$. Un effet principal significatif du temps est observé $F_{(2.04,30.61)} = 27.12573$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = .644$. En moyenne, les scores à la VAS FP étaient de $M = 4.94$, IC à 95% [4.29 ; 5.59] au Bloc 1, de $M = 5.88$, IC à 95% [5.16 ; 6.59] au Bloc 2, de $M = 6.66$, IC à 95% [6.13 ; 7.19] au bloc 3 et de $M = 7.06$, IC à 95% [6.41 ; 7.71] au Bloc 4 (voir figure 10). Des analyses post-hoc ont été réalisées. Les résultats suggèrent que, tout comme pour les mesures d'effort mental, cette augmentation est d'abord linéaire, puis tendent à se stabiliser en fin de tâche. En effet, seule la différence entre le Bloc 3 et le Bloc 4 n'atteint pas le seuil de significativité ($p_{\text{Tukey}} = .412$).

Une interaction significative Condition x Temps est observée $F_{(1,99,29,85)} = 6.676, p = .004, \eta^2_p = .308$. L'examen de cette interaction révèle des profils d'évolution divergents selon la condition. Les analyses post-hoc montrent qu'en condition simple, la fatigue physique augmente significativement entre le Bloc 1 et le Bloc 4 ($\Delta = +3.00, p < .001$), tandis qu'en condition double, l'augmentation est rapide en début de tâche puis se stabilise, le delta total Bloc 1 - Bloc 4 n'atteignant pas le seuil de significativité ($p = .129$).

Figure 10. Estimation des moyennes marginales de la VAS FP temps*condition



6.2 VFC

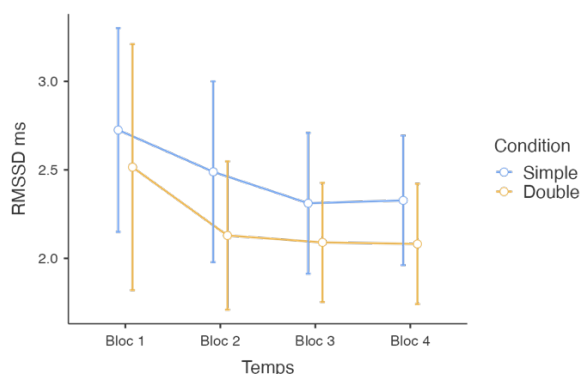
Tableau 6. ANOVA à mesure répétée 2 (condition : simple vs double) x 4 (temps : bloc 1 vs bloc 2 vs bloc 3 vs bloc 4) VFC

Indices	Effet	ddl	Carrés moyens	F	p	η^2_p
RMSSD	Condition	1,14	2.018	4.482	.053	.243
	Temps	1.30,18.16	2.711	5.843	.020	.294
	Condition x Temps	1.42,19.85	0.075	0.362	.628	.025
LF	Condition	1,14	467.14	4.660	.049	.250
	Temps	1.56, 21.87	477.90	14.10	<0.001	.502
	Condition x Temps	1.46, 20.40	55.10	3.240	.073	.188
SampEn	Condition	1,14	0.071	1.302	.273	.085
	Temps	2.14,29.95	0.095	4.650	.016	.249
	Condition x Temps	2.57,35.93	0.005	0.402	.722	.028

6.2.1. RMSSD

Aucun effet significatif de la Condition n'est observé, bien qu'une tendance soit notable, $F_{(1,14)} = 4.482$, $p = .053$, $\eta^2_p = .243$, les valeurs de RMSSD étant en moyenne plus faibles en condition double $M = 2.20$, IC à 95% [1.78 ; 2.63] qu'en condition simple $M = 2.46$, IC à 95% [2.03 ; 2.90]. Un effet principal du temps significatif est observé, $F_{(1,30,18.16)} = 5.843$, $p = 0.02$, $\eta^2_p = 0.294$. En moyenne, le RMSSD était de $M = 2.62$ ms, IC à 95% [2.03 ; 3.21] au bloc 1, de $M = 2.31$ ms, IC [1.87 ; 2.85] au bloc 2, de $M = 2.20$, IC à 95% [1.85 ; 2.55] au bloc 3 et de $M = 2.20$, IC à 95% [1.87 ; 2.54] au bloc 4. Des analyses post-hoc (test de Tukey) ont été réalisées. Ces analyses ont indiqué que cette diminution de RMSSD est principalement portée par la différence entre le Bloc 1 et le Bloc 2 ($p_{\text{Tukey}} = .014$) et entre le Bloc 1 et le Bloc 3 ($p_{\text{Tukey}} = .05$). En revanche, la différence entre le Bloc 1 et le Bloc 4 n'atteint pas le seuil de significativité ($p_{\text{Tukey}} = .122$), tout comme les comparaisons entre les blocs suivants. Aucune interaction significative Condition x Temps n'est observée $F_{(1,42,19.85)} = 0.362$, $p = .628$, $\eta^2_p = .025$. Un récapitulatif des moyennes marginales est disponible à la figure 11.

Figure 11. Estimation des moyennes marginales du RMSSD temps*condition.

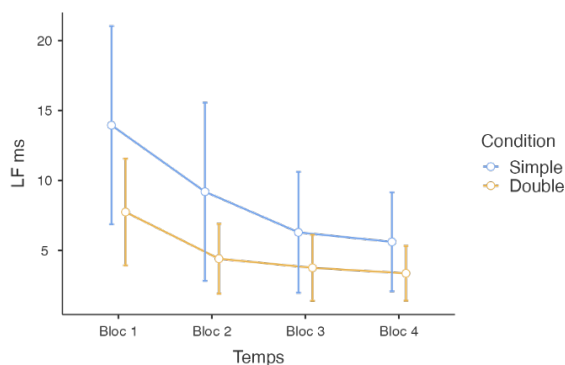


6.2.2. LF

Un effet principal significatif de la condition est observé, $F_{(1,14)} = 4.660$, $p = .049$, $\eta^2_p = .250$, les valeurs de LF étant en moyenne plus faibles en condition double $M = 4.82$, IC à 95% [2.31 ; 7.32] qu'en condition simple $M = 8.76$, IC à 95% [3.68 ; 13.84]. Un effet principal significatif du temps a également été observé, $F_{(1,56,21.87)} = 14.10$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.502$. L'analyse des moyennes marginales, indique que les valeurs du LF diminuent au fur et à mesure de la tâche.

En moyenne, le LF était de $M = 10.85$ ms, IC à 95% [5.86 ; 15.83] au bloc 1, de $M = 6.80$ ms, IC [2.76 ; 10.84] au bloc 2, de $M = 5.02$, IC à 95% [1.91 ; 8.13] au bloc 3 et de $M = 4.49$, IC à 95% [2.00 ; 6.97] au bloc 4. Des analyses post-hoc (test de Tukey) ont été réalisées. Ces analyses ont indiqué que cette diminution de LF est significative entre le Bloc 1 et le Bloc 2 ($p_{\text{Tukey}} = .007$), entre le Bloc 1 et le Bloc 3 ($p_{\text{Tukey}} = .003$), entre le Bloc 1 et le Bloc 4 ($p_{\text{Tukey}} = .005$). À l'inverse, aucune différence significative n'a été détectée lors des comparaisons entre les blocs 2, 3 et 4. Même si aucune interaction significative Condition x Temps n'a été observée après correction de Greenhouse-Geisser, nous pouvons noter une tendance $F_{(1.46,20.40)} = 3.240$, $p = .073$, $\eta^2_p = .188$. L'inspection des moyennes marginales indique que les deux conditions présentent une diminution similaire, mais que cette diminution est plus prononcée en condition simple avec $M = 13.95$, IC à 95% [6.86 ; 21.04] au bloc 1 à $M = 5.61$, IC à 95% [2.08 ; 9.15] au bloc 4, qu'en condition double avec $M = 7.74$, IC à 95% [3.92 ; 11.56] au bloc 1 à $M = 3.36$, IC à 95% [1.40 ; 5.32] au bloc 4. Un récapitulatif des moyennes marginales se trouve figure 12.

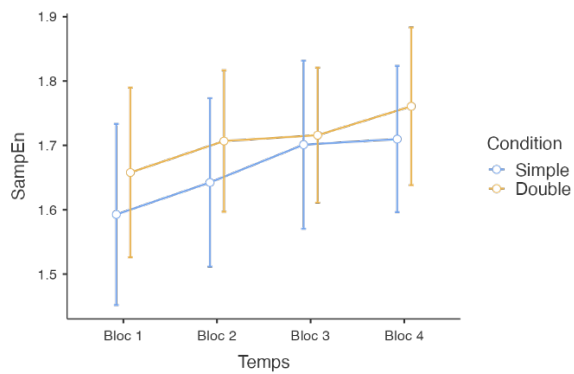
Figure 12. Estimation des moyennes marginales du LF condition*temps



6.2.3. SampEn

Aucun effet significatif de la Condition n'est observé, $F_{(1,14)} = 1.302$, $p = .273$, $\eta^2_p = .085$, ni d'interaction Condition x Temps, $F_{(2.57,35.93)} = 0.402$, $p = .722$, $\eta^2_p = .028$. Un effet principal significatif du Temps est observé, $F_{(2.14,29.95)} = 4.650$, $p = .016$, $\eta^2_p = .249$. Les valeurs augmentent progressivement du Bloc 1 $M = 1.63$, IC à 95% [1.51 ; 1.74] au bloc 4 $M = 1.74$, IC à 95% [1.63 ; 1.84] (voir figure 13). Les analyses post-hoc indiquent que seule la comparaison Bloc 1 – Bloc 4 atteint le seuil de significativité ($p_{\text{Tukey}} = .043$), les autres comparaisons demeurant non significatives.

Figure 13. Estimation des moyennes marginales du SampEn temps*condition



6.3 Analyses corrélationnelles

Tableau 7. Matrice de corrélation entre les VAS (EM, EP, FM, FP) et les indices de VFC (RMSSD, LF) pour la condition fatigue physique simple.

Variable	1	2	3	4	5	6
1. pct_RMSSD	—					
2. pct_LF_ms.2	-.504 .058	—				
3. delta_VASEM	.615* .015	-.306 .268	—			
4. delta_VASEP	.345 .208	-.444 .097	.393 .147	—		
5. delta_VASFM	.482 .069	-.566* .028	.665** .007	.504 .056	—	
6. delta_VASFP	.363 .184	-.619* .014	.161 .567	.705** .003	.484 .068	—

Tableau 8. Matrice de corrélation entre les VAS (EM, EP, FM, FP) et les indices de VFC (RMSSD, LF) pour la condition fatigue combinée.

Variable	1	2	3	4	5	6
1. pct_RMSSD	—					
2. pct_LF_ms.2	.365 .165	—				
3. delta_VASEM	.049 .857	-.131 .628	—			
4. delta_VASEP	-.257 .336	-.313 .237	.101 .708	—		
5. delta_VASFM	-.152 .574	-.065 .810	.412 .113	.628** .009	—	
6. delta_VASFP	-.247 .356	-.038 .888	.154 .568	.754*** <.001	.806*** <.001	—

En condition physique simple, trois corrélations significatives sont observées entre les scores de changement des mesures subjectives et ceux des indices de VFC. Le delta de l'effort mental perçu est corrélé positivement au pourcentage de changement du RMSSD ($p = .015$), indiquant que les participants ayant rapporté la plus forte augmentation d'effort mental perçu au cours de la tâche sont également ceux dont le RMSSD a le moins diminué, voire augmenté, entre le bloc 1 et le bloc 4. Par ailleurs, deux corrélations négatives significatives apparaissent entre le pourcentage de changement de la LF et, d'une part, le delta de la fatigue mentale perçue ($p = .028$), d'autre part, le delta de la fatigue physique perçue ($p = .014$). Ces deux relations indiquent que plus les participants rapportent une augmentation marquée de leur fatigue, qu'elle soit mentale ou physique, au cours de la tâche, plus leur LF tend à diminuer entre le début et la fin de l'effort. Aucune des autres corrélations entre les mesures subjectives et les indices de VFC n'atteint le seuil de significativité (EM x LF : $p = .268$; EP x RMSSD : $p = .208$; EP x LF : $p = .097$; FM x RMSSD : $p = .069$; FP x RMSSD : $p = .184$).

En condition double, en revanche, aucune corrélation significative n'est observée entre les mesures subjectives et les indices de VFC (EM x RMSSD : $p = .857$; EM x LF : $p = .628$; EP

x RMSSD : $p = .336$; EP x LF : $p = .237$; FM x RMSSD : $p = .574$; FM x LF : $p = .810$; FP
x RMSSD : $p = .356$; FP x LF : $p = .888$).

7. Discussion

Ce mémoire avait pour objectif d'examiner les effets d'une induction combinée de fatigue mentale et physique sur l'activité du système nerveux autonome, tel que reflété par la VFC, en comparaison avec une induction isolée de fatigue physique. Afin de répondre à cette question, différents indices de VFC ont été examinés en tâche simple et double, et ce afin de distinguer les contributions sympathique et parasympathique à la régulation autonome aux aspects physiques et cognitifs de la fatigue. Dans ce contexte, quatre hypothèses avaient été formulées : premièrement, la fatigue physique devait entraîner une diminution des indices de VFC ; deuxièmement, l'ajout d'une tâche cognitive devait moduler l'évolution de ces indices ; troisièmement, des corrélations distinctes devaient être observées entre les indices de VFC et les mesures subjectives d'effort et de fatigue en condition physique simple ; quatrièmement, à titre exploratoire, ces corrélations devaient s'avérer plus faibles en condition double.

7.1 Analyse des résultats

7.1.1. Induction des états de fatigue et d'effort

Avant d'interpréter les résultats obtenus, il convient de s'assurer que le protocole expérimental a bien induit les états de fatigue et d'effort attendus. En effet, l'absence de fatigue subjective pourrait indiquer que les variations observées sur les mesures physiologiques reflètent autre chose que la fatigue, comme un désengagement de la tâche ou une baisse de motivation (Müller & Apps, 2019; Van Cutsem et al., 2017).

Concernant l'effort mental perçu, il a augmenté au cours du temps dans les deux conditions. Ces résultats nous permettent donc d'affirmer que les tâches d'induction de fatigue, qu'elle soit physique ou double, induisaient bien un effort subjectif croissant chez les participants. Cependant, les scores d'effort mental ont été significativement plus élevés en condition double qu'en simple. En effet, même si les résultats indiquent que l'activité physique seule a induit un sentiment subjectif d'effort mental chez les participants, l'ajout d'une tâche, ici la TLDB, induisant de la fatigue cognitive obligeant le participant à mobiliser davantage de ressources cognitives semble avoir accentué l'effort mental ressenti chez les participants. Bien que l'effort mental semble donc influencé par le type de tâche, les effets d'une double tâche (physique et mentale) sur celui-ci semblent cumulatifs, ce qui corrobore la littérature actuelle (Jin et al., 2024; Marcora et al., 2009; Mehta & Parasuraman, 2014).

Concernant la variable effort physique, il a également augmenté au cours du temps lors des deux tâches d'induction de fatigue. Tout comme l'effort mental, un effort physique subjectif a donc bien été induit chez les participants au cours de la tâche. Ces résultats vont dans le sens de la littérature, qui soutient que durant une activité physique, même maintenue à une intensité constante, on observe une augmentation progressive d'effort physique perçu (Martin et al., 2018). Cependant, aucune différence significative n'est observée en fonction de la condition. Plus concrètement, à l'ajout d'une tâche cognitive, les participants n'ont pas ressenti un effort physique plus important. Ces résultats diffèrent de ceux rapportés dans la littérature, qui soutient qu'une induction préalable de fatigue cognitive augmente le RPE lors d'une tâche physique subséquente (Marcora et al., 2009; Pageaux & Lepers, 2016; Van Cutsem et al., 2017). Toutefois, une distinction méthodologique importante doit être soulignée : dans ces études, la fatigue cognitive est induite avant l'effort physique, alors que dans notre protocole, les deux tâches sont réalisées simultanément. Cette différence pourrait expliquer la divergence observée.

Au niveau de la fatigue mentale perçue, les résultats indiquent un effet principal significatif de la condition et une interaction Temps x Condition. En condition double, la fatigue mentale subjective a significativement augmenté au cours du temps, confirmant que le protocole combiné a bien induit une fatigue mentale subjective chez les participants. En revanche, en condition physique simple, aucune augmentation significative de la fatigue mentale n'a été observée au fil des blocs. Ce contraste est cohérent avec la nature des tâches : l'absence de sollicitation cognitive externe en condition simple n'a pas généré de fatigue mentale subjective détectable, tandis que l'ajout de la TLDB en condition double sollicite les ressources attentionnelles et exécutives des participants et entraîne une accumulation progressive de fatigue mentale (Jin et al., 2024). Par ailleurs, les participants rapportaient une fatigue mentale significativement plus élevée en condition double dès le premier bloc, et ce différentiel se maintenait et s'amplifiait au fil de la tâche.

Concernant la fatigue physique subjective, les résultats montrent une augmentation significative au cours du temps, mais les profils d'évolution divergent selon la condition. En condition simple, la fatigue physique a augmenté de façon progressive et soutenue sur l'ensemble des blocs, confirmant qu'un effort à intensité moyenne, correspondant à un score de 14 à l'échelle de Borg, a bien induit une accumulation progressive de fatigue physique subjective (Scherr et al., 2013).

En condition double en revanche, la fatigue physique progressait rapidement dans les premiers temps de l'effort avant d'atteindre un plafond, l'évolution globale au cours de la tâche restant trop modérée pour atteindre le seuil de significativité statistique. Ce contraste semble inattendu. Cela pourrait s'expliquer par un effet de dissociation attentionnelle (Morgan & Pollock, 1977). Selon ce cadre théorique, le déplacement du focus attentionnel des sensations corporelles vers une source de stimulation externe atténuée la perception de la fatigue physique. Ces résultats corroborent plusieurs travaux qui ont montré qu'un distracteur attentionnel réduit le RPE lors d'un exercice d'intensité modérée (Chow & Etnier, 2017; Yamashita et al., 2006). Dans notre cas, l'engagement cognitif requis par la TLDB pourrait jouer un rôle identique : en captant les ressources attentionnelles, il aurait partiellement détourné l'attention des sensations corporelles, atténuant le ressenti de fatigue physique malgré une charge globale supérieure.

7.1.2. Évolution de la VFC lors d'une tâche physique seule

L'objectif de cette première hypothèse était de déterminer si une induction de fatigue physique entraînait une diminution des différents indices de VFC. Dans notre étude, les indices de VFC analysés étaient le Root Mean Square of Successive Differences (RMSSD), la bande basse fréquence LF et l'entropie d'échantillon SampEn. Les résultats montrent une diminution significative pour les indices RMSSD et LF. En revanche, nous observons une augmentation, significative elle aussi, de l'indice SampEn au cours de la tâche. Concernant la diminution observée pour les indices temporels et fréquentiels, ces résultats sont en accord avec la littérature. En effet, la diminution observée ici s'inscrit dans la continuité des travaux documentant un retrait progressif de l'influence parasympathique au profit d'une activation sympathique accrue lors d'un effort physique soutenu. Concernant le RMSSD, qui quantifie la variabilité à court terme des intervalles inter battement (Shaffer & Ginsberg, 2017) et constitue un reflet fiable de l'activité parasympathique vagale (Besson et al., 2020), sa diminution au cours de la tâche physique semble indiquer donc une réduction du tonus vagal, cohérente avec la sollicitation sympathique progressive induite par l'effort. Concernant LF, il rend compte de la puissance spectrale dans la bande basse fréquence (Shaffer & Ginsberg, 2017), reflétant une contribution mixte sympathique et parasympathique en lien notamment avec le fonctionnement du baroréflexe, en informant ainsi sur la balance sympatho-vagale (Besson et al., 2020; Delliaux et al., 2019). Sa diminution au cours de la tâche physique témoigne d'une réduction de la modulation autonome globale, elle aussi attendue lors d'un exercice physique soutenu. Concernant l'indice non-linéaire, SampEn présente ici une évolution contraire à celle attendue.

En effet, Mao et al. (2026) démontrent dans leur étude une diminution de cet indice en tâche physique, ce qui traduirait une perte de complexité et d'imprévisibilité du signal cardiaque sous dominance sympathique. Il convient toutefois de noter que la tâche physique employée par ces auteurs consistait en une position debout statique, et non en un exercice dynamique tel que le cyclisme utilisé dans notre étude, ce qui pourrait en partie expliquer la divergence observée. Il convient également de souligner que cette augmentation n'est significative que tardivement, la seule comparaison atteignant le seuil statistique étant celle entre le Bloc 1 et le Bloc 4, suggérant que l'effet du temps sur cet indice nécessite une exposition prolongée à la tâche pour se manifester.

7.1.3. Modulation de la VFC par l'ajout d'une tâche cognitive

La seconde hypothèse avait pour objectif de déterminer si l'ajout d'une tâche cognitive à l'effort physique modifiait l'évolution des indices de VFC comparativement à la condition physique seule. En effet, la littérature rapporte que la VFC diminue significativement lors d'un effort physique soutenu (Besson et al., 2020; Brockmann & Hunt, 2023; Mongin et al., 2022). En condition de fatigue mentale, la VFC tend à diminuer lors de l'engagement cognitif actif, reflétant une activation sympathique en réponse à la demande cognitive (Delliaux et al., 2019; Mulder & Mulder—Hajonides Van Der Meulen, 1973). Néanmoins, lorsque la durée de la tâche s'allonge considérablement, une augmentation des indices est parfois observée (Csathó et al., 2024). Celle-ci n'est pas forcément attribuée à une amélioration de la régulation autonome, mais à un désengagement progressif de la tâche. Dans la mesure où ces deux formes de fatigue sollicitent toutes deux le système nerveux autonome, leur induction simultanée était susceptible de produire des effets autonomes distincts de ceux observés lors d'inductions isolées (Chen et al., 2023; Jin et al., 2024), reflétant une sollicitation plus marquée du SNA.

Tout d'abord, concernant le RMSSD, les résultats montrent que les valeurs tendent à être plus faibles en condition double qu'en condition simple. Ce résultat ne franchit toutefois pas le seuil de significativité statistique ($p = .053$) et doit donc être interprété avec prudence. Ce résultat est cohérent avec l'idée de notre hypothèse selon laquelle la charge cognitive constitue une sollicitation autonome supplémentaire s'ajoutant à celle de l'effort physique (Jin et al., 2024). Ce résultat est particulièrement intéressant au regard des travaux de Chen et al. (2023), qui ne rapportaient pas de différence significative entre la fatigue physique seule et la fatigue combinée sur le RMSSD.

Contrairement à leur étude, la tendance observée suggère que l'ajout d'une charge cognitive pourrait bien moduler le tonus vagal au-delà de ce que produit l'effort physique seul. Cette divergence pourrait s'expliquer par une différence méthodologique. En effet, les auteurs mesuraient la VFC avant et après les protocoles de fatigue, tandis que la présente étude l'enregistre de façon continue au cours de la tâche, permettant de capter des variations autonomes plus fines et dynamiques.

Ensuite, les valeurs du LF se sont avérées significativement plus faibles en condition double qu'en condition simple. Tout comme pour le RMSSD, ce résultat contraste avec l'étude de Chen et al. (2023), qui ne rapportaient pas de différence significative entre fatigue physique seule et combinée sur les indices fréquentiels. Ce résultat suggère donc que l'ajout d'une tâche cognitive accentue bien la réduction de la modulation autonome globale au-delà de ce que produit l'effort physique seul. Ce résultat peut également être mis en lien avec des travaux qui rapportent une diminution significative de la puissance absolue du LF lors d'une tâche cognitive prolongée (Delliaux et al., 2019), et avec ceux de Tanaka et al. (2009), qui documentent un retrait vagal et une tendance à l'augmentation de l'activité sympathique en condition de fatigue du système nerveux central. L'ajout d'une charge cognitive à l'effort physique pourrait ainsi accentuer la réduction du LF au-delà de ce que produit l'exercice seul, via une double sollicitation autonome. De plus, une tendance à l'interaction entre le temps et la condition est également observée pour le LF, indiquant que les profils temporels d'évolution différaient selon la condition. En condition simple, le LF démarrait à un niveau qui diminuait progressivement au fil des blocs, traduisant une activation sympathique qui s'installait graduellement sous l'effet de l'effort physique. En condition double, le LF était en revanche déjà nettement plus bas dès le premier bloc, suggérant que la présence simultanée d'une charge cognitive dès le début de la tâche amplifie immédiatement l'activation sympathique, sans laisser de marge pour une chute ultérieure aussi marquée. Ainsi, ce n'est pas tant la dynamique de la baisse qui différait entre les deux conditions, mais le niveau d'activation autonome initial : la double tâche semble induire une sollicitation sympathique plus précoce et plus intense dès l'engagement dans l'effort.

Concernant le SampEn, les résultats ne montrent aucun effet significatif de la condition ni d'interaction. Concrètement, les valeurs de l'entropie d'échantillon, ou leur évolution, n'étaient pas significativement différentes selon la condition testée. Ce résultat, bien que non significatif, peut néanmoins être mis en perspective avec la littérature existante.

En effet, Mao et al. (2026) rapportaient que cet indice présentait des évolutions diamétralement opposées selon le type de fatigue induite : il augmentait lors d'une tâche cognitive et diminuait lors d'une tâche physique. Plus précisément, la diminution en tâche physique était attribuée à une simplification de la dynamique cardiaque sous dominance sympathique et retrait parasympathique, tandis que l'augmentation en tâche cognitive était interprétée comme le reflet des interactions complexes entre différents réseaux cérébraux, générant un niveau de complexité analogue à un phénomène de chaos se répercutant sur le système nerveux autonome et donc sur la VFC. Ces deux mécanismes étant de sens opposés, une hypothèse concernant les résultats de notre étude peut être alors qu'en condition double, leurs effets respectifs se soient partiellement neutralisés, expliquant ainsi l'absence de différence significative entre les deux conditions. Par ailleurs, la taille réduite de l'échantillon limite la puissance statistique de cette analyse, ce qui ne permet pas d'exclure l'existence d'un effet réel qui n'aurait pas pu être détecté dans le cadre de cette étude.

7.1.4. Liens entre les mesures subjectives et la VFC

La troisième hypothèse de ce mémoire postulait l'existence d'un lien entre les différentes mesures subjectives mesurée (effort mental, effort physique, fatigue mentale, fatigue physique) et la VFC. Cette hypothèse repose sur l'idée que les ressentis subjectifs d'effort et de fatigue ainsi que les modulations de la VFC reflètent, chacun à leur manière, un état d'engagement du SNA face aux contraintes de la tâche. La littérature documente en effet qu'un effort physique soutenu, tout comme une sollicitation cognitive prolongée, s'accompagne d'une diminution des indices de VFC (Besson et al., 2020; Delliaux et al., 2019).

Par ailleurs, une quatrième hypothèse, formulée à titre exploratoire, prédisait que ces corrélations seraient atténuées en condition double, en raison de la sollicitation autonome supplémentaire générée par la charge cognitive concurrente. Pour rappel, seuls les indices de VFC ayant présenté un effet significatif du facteur Condition dans les analyses de la section 5.2, à savoir le RMSSD et la LF ont été retenus pour cette analyse.

Afin de tester cette hypothèse, des corrélations de Spearman ont été effectuées. Les résultats confirment partiellement ces hypothèses. Tout d'abord en condition physique simple, trois corrélations significatives ressortent : le delta de la fatigue physique perçue (VAS FP) est négativement corrélé au pourcentage de changement du LF, le delta de la fatigue mentale perçue (VAS FM) est également négativement corrélé au pourcentage de changement du LF, et le delta

de l'effort mental perçu (VAS EM) est positivement corrélé au pourcentage de changement du RMSSD.

En revanche, aucune corrélation significative n'apparaît entre l'effort physique perçu (VAS EP) et les indices de VFC. En condition double en revanche, aucune des corrélations testées n'atteint le seuil de significativité, ce qui va dans le sens de l'hypothèse exploratoire formulée.

Concernant la fatigue physique perçue, les participants ayant rapporté la plus forte augmentation de fatigue physique au cours de la tâche sont également ceux dont la balance sympatho-vagale s'est le plus déplacée vers une dominance sympathique, entraînant une chute plus marquée de l'indice LF, ce qui va dans le sens de la littérature (Besson et al., 2020; Brockmann & Hunt, 2023; Mongin et al., 2022). Cette association révèle que la variabilité interindividuelle des ressentis subjectifs semblait suivre fidèlement celle des ajustements autonomes. En d'autres termes, à charge physique équivalente, tous les participants n'ont donc pas réagi de la même manière, et leurs ressentis subjectifs semblaient correspondre à ceux de leurs modulations autonomes. Ce résultat entre dimension subjective et dimension physiologique appuie l'idée que, en condition d'induction de fatigue physique simple, la VAS de fatigue physique constituerait un indicateur perceptif fidèle de l'état autonome sous-jacent.

Concernant la fatigue mentale perçue, une corrélation négative est également observée entre son évolution et celle du LF : les participants dont la fatigue mentale a le plus augmenté au cours de la tâche sont également ceux dont le LF a le plus diminué. Cette association doit toutefois être interprétée avec prudence. Au niveau du groupe, la fatigue mentale subjective n'a pas augmenté significativement en condition physique simple (voir section 7.1.1), de sorte que la corrélation reflète des variations individuelles plutôt qu'une tendance commune au groupe. Plus précisément, ce résultat indique que chez les participants qui ont rapporté malgré tout une augmentation de fatigue mentale au cours de la tâche, cette augmentation s'accompagnait d'une diminution plus marquée du LF. Ce pattern peut être mis en lien avec la littérature, documentant une réduction du LF lors de l'émergence d'une fatigue mentale après une tâche cognitive (Delliaux et al., 2019). Une nuance importante doit toutefois être apportée : contrairement à ces travaux, notre condition physique simple ne comportait aucune sollicitation cognitive externe. La fatigue mentale rapportée par les participants pourrait donc refléter une réalité différente, par exemple l'effort attentionnel requis pour maintenir la cadence sur 20 minutes, ou un recouvrement avec d'autres dimensions du ressenti subjectif.

Comme déjà évoqué, la littérature semble, par ailleurs, divergente à ce sujet. La portée de ce résultat demeure ainsi limitée par l'absence d'effet temporel significatif au niveau du groupe.

Concernant l'effort mental perçu, une corrélation positive est observée entre son évolution et celle du RMSSD : les participants ayant rapporté la plus forte augmentation d'effort mental au cours de la tâche sont également ceux dont le RMSSD a le moins diminué, voire augmenté. Ce résultat apparaît contre-intuitif au regard de la littérature classique liant sollicitation cognitive et retrait vagal, qui aurait laissé attendre une corrélation négative (Delliaux et al., 2019; Mao et al., 2026). Comme évoqué précédemment pour la fatigue mentale, la condition physique simple ne comportait aucune tâche cognitive externe : l'effort mental perçu ne captait donc pas la sollicitation cognitive d'une tâche imposée, mais plutôt l'effort attentionnel requis pour maintenir la cadence sur 20 minutes. Plusieurs lectures peuvent alors être envisagées, sans qu'aucune ne s'impose avec certitude. Une hypothèse serait que les participants dont le tonus vagal résiste le mieux à la sollicitation physique soient ceux qui mobilisent activement des ressources de contrôle pour soutenir la tâche, et qui rapportent en conséquence un effort mental plus élevé. Cette lecture ne contredit pas nécessairement celle proposée pour la fatigue mentale, dans la mesure où le RMSSD et le LF n'indexent pas la même facette de la régulation autonome (le premier reflète exclusivement le tonus vagal, tandis que le second traduit une contribution mixte sympathique et parasympathique). Cette interprétation doit toutefois être prise avec prudence. La taille réduite de l'échantillon ($N = 16$) et le caractère multiple des corrélations testées rendent plausible un faux positif statistique. Il est également possible que la corrélation observée reflète un lien indirect que les données ne permettent pas d'identifier précisément. Cette association mériterait d'être répliquée sur un échantillon plus large avant d'être considérée comme robuste.

Enfin, concernant la condition double, aucune corrélation significative n'apparaît entre les mesures subjectives et les indices de VFC. Plusieurs hypothèses, quant à ces résultats, peuvent être formulées. D'abord, la condition double soumet le SNA à une double sollicitation (physique et mentale), ce qui pourrait brouiller la relation entre une mesure subjective ciblée et un indice de VFC. Ensuite, comme évoqué en section 7.1.3, le LF est significativement plus faible en condition double, ce qui réduit la marge de variation disponible et limite la possibilité d'observer une covariation marquée.

Enfin, l'ajout de la TLDB obligeait les participants à concentrer leur attention sur la tâche cognitive, ce qui pouvait les rendre moins à l'écoute de leur ressenti interne et donc moins en phase avec les modulations autonomes qui les accompagnaient. À ces éléments s'ajoute une observation : en condition double, les mesures subjectives sont fortement corrélées entre elles (EP x FP : $r = .754$; FM x FP : $r = .806$), bien plus qu'en condition simple. Ce pattern suggère que les participants pouvaient ne plus distinguer aussi clairement les différentes dimensions du ressenti (effort vs fatigue, mental vs physique), convergeant vers un état global de surcharge. Si les VAS captent une expérience plus indifférenciée, il devient difficile pour chacune d'entre elles d'être spécifiquement alignées avec un indice de VFC particulier.

7.2 Implications théoriques et application pratique

1.1.1 Implications théoriques

Ce mémoire apporte des éléments supplémentaires à la compréhension des effets conjoints de la fatigue mentale et physique sur l'activité du système nerveux autonome, reflétée par la VFC. Plusieurs implications théoriques et pratiques peuvent en être repérées.

Dans un premier temps, ce travail confirme les observations rapportées dans la littérature concernant les effets d'un effort physique isolé sur la VFC. La diminution du RMSSD et du LF observée en condition physique simple reflète le retrait vagal et l'activation sympathique typiquement associés à l'effort physique modéré (Besson et al., 2020; Brockmann & Hunt, 2023; Mongin et al., 2022).

Ensuite, ce mémoire apporte une nouvelle perspective concernant les effets d'une induction combinée de fatigue mentale et physique. Comme abordé dans la revue de littérature, les rares études ayant abordé cette combinaison présentent des résultats divergents. Nos résultats suggèrent que l'ajout d'une tâche cognitive à un effort physique accentue la modulation autonome, et que cette accentuation est particulièrement marquée pour l'indice LF. Ce résultat suggère alors une sollicitation cumulée des deux types de fatigue. Il propose donc un éclairage nouveau au débat actuel et invite à considérer la combinaison de fatigue mentale et physique comme un facteur d'aggravation de la charge autonome.

De plus, ce travail met en évidence une dissociation entre la dimension subjective et la dimension physiologique en condition de double tâche. Bien qu'en condition physique simple plusieurs corrélations significatives soient observées entre l'évolution des VAS et celle des

indices de VFC, ces associations disparaissent en condition double. Cela implique que la correspondance observée entre mesures subjectives et mesures physiologiques ne semble pas garantie en contexte de double tâche, particulièrement lorsque l'attention est mobilisée par une tâche cognitive externe.

Enfin, ce mémoire permet de souligner l'intérêt de combiner plusieurs domaines d'analyse de la VFC pour capter différents aspects de la régulation autonome. Si le RMSSD et le LF se sont montrés sensibles aux différentes tâches appliquées, l'indice non-linéaire SampEn n'a pas révélé d'effet significatif, ce qui semble cohérent avec la divergence observée des résultats de la littérature sur ce type d'indices (Csathó et al., 2024; Mao et al., 2026)

1.1.2 Application pratique

Dans le domaine sportif, l'effort physique s'accompagne la plupart du temps d'une sollicitation cognitive, comme la prise de décision tactique, l'anticipation ou la gestion de l'effort. Le suivi de la charge d'entraînement peut reposer sur la perception subjective de l'effort ou de la fatigue de l'athlète. Les résultats de notre étude invitent alors, ou encourage l'utilisation de suivi physiologique dans les contextes sportifs où la sollicitation cognitive est marquée. En effet, nos résultats suggérant que les associations entre la VFC et les mesures subjectives se réduisent en condition de double tâche, les échelles subjectives pourraient s'avérer moins fiables pour rendre compte de la charge autonome réelle du sportif.

Enfin, ces résultats présentent également un intérêt pour les professions demandant le maintien d'une vigilance cognitive soutenue associée à un engagement physique, comme par exemple les militaires, les chirurgiens, les pompiers ou les opérateurs sur chantier. Dans ces contextes, la fatigue cognitivo-physique constitue un facteur reconnu d'erreurs et d'accidents (Gündoğan & Erdağı Oral, 2023; Ibrahim et al., 2023; Mul Fedele et al., 2023). La chute rapide de la VFC dès les premières minutes de la double tâche alerte sur la rapidité avec laquelle les capacités d'adaptation physiologique s'épuisent dans cette condition. À l'image de ce qui pourrait être envisagé en contexte sportif, l'intégration d'un suivi de la VFC pourrait alors constituer une piste pour objectiver la charge autonome chez ces profils, et donc la fatigue associée, notamment dans une perspective de prévention des erreurs et des accidents.

7.3 Limites et perspectives de recherche

Comme toute étude scientifique, ce mémoire comporte plusieurs limites qu'il convient de prendre en considération dans l'interprétation des résultats. Ces limites n'invalident pas les données obtenues, mais soulignent qu'il est nécessaire de rester prudent et ouvrent simultanément des pistes pour de futures recherches.

Une première limite de cette étude est la taille de l'échantillon analysé ($N = 16$), réduite par rapport à l'échantillon de base du projet initial en raison de l'intégration tardive du dispositif d'enregistrement de la VFC et de l'exclusion de données inexploitable. L'analyse de sensibilité indique que l'étude n'est en mesure de détecter que des tailles d'effet comprises entre moyenne et élevée ($f \geq 0,34$). Cette taille d'échantillon réduite impacte donc grandement la puissance statistique.

Une deuxième limite concerne la durée des tâches d'induction de fatigue (20 minutes), qui reste nettement inférieure aux protocoles utilisés dans les principales études de référence sur la fatigue mentale (50 à 182 minutes chez Csathó et al., 2024 ; 60 minutes chez Delliaux et al., 2019). Il serait dès lors intéressant, dans de futures recherches, d'allonger la durée des tâches d'induction afin de favoriser l'installation d'un véritable état de fatigue mentale, de capter des effets autonomes potentiellement plus marqués et d'assurer une meilleure comparabilité avec la littérature existante.

Une troisième limite porte sur le mode de calibration de l'intensité de l'effort physique. Celle-ci reposait sur une consigne subjective (un effort perçu de 14 sur l'échelle de Borg ; Scherr et al., 2013), ce qui ne garantit pas une intensité physiologique équivalente entre participants. Ce mode de calibration semble d'ailleurs pouvoir expliquer une grande partie de la variabilité interindividuelle importante des valeurs des indices de VFC observées au bloc 1. Pour les recherches futures, il serait pertinent de calibrer l'effort sur la base de paramètres physiologiques individualisés, par exemple un pourcentage de la fréquence cardiaque maximale ou de la puissance aérobie maximale, ou en le rapportant au seuil ventilatoire propre à chaque participant (Cottin et al., 2004).

Une quatrième limite est le manque de validité écologique des tâches. En effet, bien que l'utilisation de ces tâches soit justifiée par la littérature actuelle, elles restent éloignées des tâches retrouvées en situation réelle, comme une compétition sportive par exemple. Par conséquent, les résultats sont difficilement transférables à des situations plus écologiques.

Finalement, une dernière piste à considérer pour les recherches futures concerne les analyses corrélationnelles présentées dans la section 6.3. Vingt-quatre corrélations ont été testées sans correction pour les comparaisons multiples, ce qui augmente mécaniquement le risque de faux positifs statistiques. Les associations rapportées doivent dès lors être considérées comme exploratoires et nécessitant une réplication. Les futures recherches gagneraient à restreindre le nombre de tests et à appliquer une correction adaptée (Bonferroni, Holm), ou à recourir à un modèle multivarié.

8. Conclusion générale.

Ce mémoire avait pour objectif d'examiner les effets d'une induction combinée de fatigue mentale et physique sur l'activité du système nerveux autonome, reflétée par la VFC, en comparaison avec une induction isolée de fatigue physique. Bien que les effets isolés de ces deux types de fatigue sur différents indices de la VFC aient été largement documentés dans la littérature, leurs effets conjoints restent peu étudiés à l'heure actuelle. De plus, les rares études les ayant abordés présentent des résultats divergents. Ce travail avait donc pour objectif d'apporter une nouvelle perspective à ce sujet.

Les résultats obtenus indiquent que l'effort physique seul entraîne une diminution des indices temporels et fréquentiels de la VFC, reflétant un retrait vagal et une activation sympathique, en accord avec les travaux antérieurs. L'ajout d'une tâche cognitive accentue alors cette modulation autonome, particulièrement marquée pour l'indice LF, suggérant une sollicitation cumulée des deux types de fatigue. Par ailleurs, les associations observées entre les mesures subjectives et la VFC en condition physique simple disparaissent en condition double, traduisant un découplage entre les dimensions perçue et physiologique lorsqu'une charge cognitive s'ajoute à l'effort physique.

Concernant les mesures subjectives, les résultats confirment l'induction effective d'états d'effort et de fatigue au cours des deux tâches. L'effort mental perçu et la fatigue mentale sont significativement plus élevés en condition double, attestant de la sollicitation cognitive supplémentaire induite par la tâche TLDB. L'évolution de la fatigue physique perçue diffère également selon la condition, avec une augmentation progressive en condition simple et une stabilisation plus précoce en condition double, possiblement attribuable à un phénomène de dissociation attentionnelle.

Ces résultats appuient l'intérêt de la VFC comme marqueur sensible de l'engagement du SNA lors d'un effort cognitivo-physique. Ils éclairent également sur les limites des auto-évaluations subjectives dans des contextes de double tâche (physique et mentale). En effet, les mesures subjectives semblent fiables en condition d'effort physique isolé, mais deviendraient insuffisantes pour rendre compte de l'état autonome réel lorsqu'une charge cognitive est ajoutée. Elles gagneraient donc à être combinées à un suivi physiologique dans les situations appliquées. Compte tenu de la taille réduite de l'échantillon et des différentes limites abordées, ces conclusions demeurent toutefois préliminaires et nécessitent d'être confirmées par des recherches futures.

En conclusion, ce mémoire souligne que l'ajout d'une charge cognitive à un effort physique modifie la dynamique autonome et l'articulation entre ressenti et physiologie, et invite à poursuivre l'étude de la fatigue combinée à travers des approches intégrant simultanément les dimensions subjective, comportementale et autonome.

9. Bibliographie

- Aaronson, L. S., Teel, C. S., Cassmeyer, V., Neuberger, G. B., Pallikkathayil, L., Pierce, J., Press, A. N., Williams, P. D., & Wingate, A. (1999). Defining and Measuring Fatigue. *Image: The Journal of Nursing Scholarship*, 31(1), 45-50.
<https://doi.org/10.1111/j.1547-5069.1999.tb00420.x>
- Apps, M. A. J., Grima, L. L., Manohar, S., & Husain, M. (2015). The role of cognitive effort in subjective reward devaluation and risky decision-making. *Scientific Reports*, 5(1), 16880. <https://doi.org/10.1038/srep16880>
- Azevedo, R., Silva-Cavalcante, M. D., Gualano, B., Lima-Silva, A. E., & Bertuzzi, R. (2016). Effects of caffeine ingestion on endurance performance in mentally fatigued individuals. *European Journal of Applied Physiology*, 116(11-12), 2293-2303.
<https://doi.org/10.1007/s00421-016-3483-y>
- Bafna, T., & Hansen, J. P. (2021). Mental fatigue measurement using eye metrics : A systematic literature review. *Psychophysiology*, 58(6), e13828.
<https://doi.org/10.1111/psyp.13828>
- Benoit, C.-E., Solopchuk, O., Borragán, G., Carbonnelle, A., Van Durme, S., & Zénon, A. (2019). Cognitive task avoidance correlates with fatigue-induced performance decrement but not with subjective fatigue. *Neuropsychologia*, 123, 30-40.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.06.017>
- Besson, C., Saubade, M., Gremeaux, V., Millet, G. P., & Schmitt, L. (2020). Analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque : Méthodes, limites et exemples cliniques. *Revue Médicale Suisse*, 16(701), 1432-1437.
<https://doi.org/10.53738/REVMED.2020.16.701.1432>
- Blain, B., Hollard, G., & Pessiglione, M. (2016). Neural mechanisms underlying the impact of daylong cognitive work on economic decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(25), 6967-6972. <https://doi.org/10.1073/pnas.1520527113>

- Blain, B., Schmit, C., Aubry, A., Hausswirth, C., Le Meur, Y., & Pessiglione, M. (2019). Neuro-computational Impact of Physical Training Overload on Economic Decision-Making. *Current Biology*, 29(19), 3289-3297.e4.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.08.054>
- Boksem, M. A. S., Meijman, T. F., & 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>
- Boyas, S., & Guével, A. (2011). Neuromuscular fatigue in healthy muscle : Underlying factors and adaptation mechanisms. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 54(2), 88-108. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2011.01.001>
- Brockmann, L., & Hunt, K. J. (2023). Heart rate variability changes with respect to time and exercise intensity during heart-rate-controlled steady-state treadmill running. *Scientific Reports*, 13(1), 8515. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35717-0>
- Brown, D. M. Y., Graham, J. D., Innes, K. I., Harris, S., Flemington, A., & Bray, S. R. (2020). Effects of Prior Cognitive Exertion on Physical Performance : A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine*, 50(3), 497-529.
<https://doi.org/10.1007/s40279-019-01204-8>
- Carroll, T. J., Taylor, J. L., & Gandevia, S. C. (2017). Recovery of central and peripheral neuromuscular fatigue after exercise. *Journal of Applied Physiology*, 122(5), 1068-1076. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00775.2016>
- Chen, Y., Liu, M., Zhou, J., Bao, D., Li, B., & Zhou, J. (2023). Acute Effects of Fatigue on Cardiac Autonomic Nervous Activity. *Journal of Sports Science and Medicine*, 806-815. <https://doi.org/10.52082/jssm.2023.806>

- Chow, E. C., & Etnier, J. L. (2017). Effects of music and video on perceived exertion during high-intensity exercise. *Journal of Sport and Health Science*, 6(1), 81-88.
<https://doi.org/10.1016/j.jshs.2015.12.007>
- Chung, V., Chopin, L., Karadayi, J., & Grèzes, J. (2026). Validity of the Polar H10 for Continuous Measures of Heart Rate and Heart Rate Synchrony Analysis. *Sensors*, 26(3), 855. <https://doi.org/10.3390/s26030855>
- Cottin, F., M??Digue, C., Lepr??Tre, P.-M., Papelier, Y., Koralsztein, J.-P., & Billat, V. (2004). Heart Rate Variability during Exercise Performed below and above Ventilatory Threshold: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(4), 594-600.
<https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000121982.14718.2A>
- Csathó, Á., Van Der Linden, D., & Matuz, A. (2024). Change in heart rate variability with increasing time-on-task as a marker for mental fatigue : A systematic review. *Biological Psychology*, 185, 108727. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2023.108727>
- Delliaux, S., Delaforge, A., Deharo, J.-C., & Chaumet, G. (2019). Mental Workload Alters Heart Rate Variability, Lowering Non-linear Dynamics. *Frontiers in Physiology*, 10, 565. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00565>
- Dietrich, A., & Audiffren, M. (2011). The reticular-activating hypofrontality (RAH) model of acute exercise. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 35(6), 1305-1325.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.02.001>
- Gandevia, S. C. (2001). Spinal and Supraspinal Factors in Human Muscle Fatigue. *Physiological Reviews*, 81(4), 1725-1789.
<https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.4.1725>
- Guillemin, C., Hammad, G., Read, J., Requier, F., Charonitis, M., Delrue, G., Vandeleene, N., Lommers, E., Maquet, P., & Collette, F. (2022). Pupil response speed as a marker of

- cognitive fatigue in early Multiple Sclerosis☆. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, 65, 104001. <https://doi.org/10.1016/j.msard.2022.104001>
- Gündoğan, G., & Erdağı Oral, S. (2023). The effects of alarm fatigue on the tendency to make medical errors in nurses working in intensive care units. *Nursing in Critical Care*, 28(6), 996-1003. <https://doi.org/10.1111/nicc.12969>
- Halson, S. L. (2014). Monitoring Training Load to Understand Fatigue in Athletes. *Sports Medicine*, 44(S2), 139-147. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0253-z>
- Hutchinson, J. C., & Tenenbaum, G. (2007). Attention focus during physical effort : The mediating role of task intensity. *Psychology of Sport and Exercise*, 8(2), 233-245. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2006.03.006>
- Ibrahim, A., Nnaji, C., Namian, M., Koh, A., & Techera, U. (2023). Investigating the impact of physical fatigue on construction workers' situational awareness. *Safety Science*, 163, 106103. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106103>
- Ishii, A., Tanaka, M., & Watanabe, Y. (2014). Neural mechanisms of mental fatigue. *Reviews in the Neurosciences*, 0(0). <https://doi.org/10.1515/revneuro-2014-0028>
- Jin, H., Xiao, M., Liu, L., Kan, S., Fu, Y., & Zhang, D. (2024a). Relationship between physical fatigue and mental fatigue based on multimodal measurement under different load levels. *Ergonomics*, 67(11), 1748-1763. <https://doi.org/10.1080/00140139.2024.2364667>
- Karemaker, J. M. (2017). An introduction into autonomic nervous function. *Physiological Measurement*, 38(5), R89-R118. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aa6782>
- Kluger, B. M., Krupp, L. B., & Enoka, R. M. (2013). Fatigue and fatigability in neurologic illnesses : Proposal for a unified taxonomy. *Neurology*, 80(4), 409-416. <https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e31827f07be>

Kubios Oy. (2024). *Kubios HRV Standard* (Version 4.3.0) [Logiciel].

<https://www.kubios.com>

Kunasegaran, K., Ismail, A. M. H., Ramasamy, S., Gnanou, J. V., Caszo, B. A., & Chen, P. L.

(2023). Understanding mental fatigue and its detection : A comparative analysis of assessments and tools. *PeerJ*, *11*, e15744. <https://doi.org/10.7717/peerj.15744>

Labelle, V., Bosquet, L., Mekary, S., & Bherer, L. (2013). Decline in executive control during

acute bouts of exercise as a function of exercise intensity and fitness level. *Brain and Cognition*, *81*(1), 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.10.001>

Lim, J., Wu, W., Wang, J., Detre, J. A., Dinges, D. F., & Rao, H. (2010). Imaging brain

fatigue from sustained mental workload : An ASL perfusion study of the time-on-task effect. *NeuroImage*, *49*(4), 3426-3435.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.11.020>

Lorist, M. M., Boksem, M. A. S., & Ridderinkhof, K. R. (2005). Impaired cognitive control

and reduced cingulate activity during mental fatigue. *Cognitive Brain Research*, *24*(2), 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.01.018>

Mao, T., Okutomi, H., & Umeno, K. (2026). Chaotic fluctuations mark the sign of mental

activity in task-based heart rate variability. *Scientific Reports*, *16*(1), 9221.

<https://doi.org/10.1038/s41598-026-43385-z>

Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical

performance in humans. *J Appl Physiol*, *106*.

Martin, K., Meeusen, R., Thompson, K. G., Keegan, R., & Rattray, B. (2018). Mental Fatigue

Impairs Endurance Performance : A Physiological Explanation. *Sports Medicine*, *48*(9), 2041-2051. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0946-9>

Mehta, R. K., & Parasuraman, R. (2014). Effects of Mental Fatigue on the Development of

Physical Fatigue : A Neuroergonomic Approach. *Human Factors: The Journal of the*

- Human Factors and Ergonomics Society*, 56(4), 645-656.
<https://doi.org/10.1177/0018720813507279>
- Millet, G. Y., Bertrand, M. F., Lapole, T., Féasson, L., Rozand, V., & Hupin, D. (2023). Measuring objective fatigability and autonomic dysfunction in clinical populations : How and why? *Frontiers in Sports and Active Living*, 5, 1140833.
<https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1140833>
- Mizuno, K., Tanaka, M., Yamaguti, K., Kajimoto, O., Kuratsune, H., & Watanabe, Y. (2011). Mental fatigue caused by prolonged cognitive load associated with sympathetic hyperactivity. *Behavioral and Brain Functions*, 7(1), 17. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-7-17>
- Mongin, D., Chabert, C., Extremera, M. G., Hue, O., Courvoisier, D. S., Carpena, P., & Galvan, P. A. B. (2022). Decrease of heart rate variability during exercise : An index of cardiorespiratory fitness. *PLOS ONE*, 17(9), e0273981.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273981>
- Morgan, W. P., & Pollock, M. L. (1977). PSYCHOLOGIC CHARACTERIZATION OF THE ELITE DISTANCE RUNNER. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 301(1), 382-403. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1977.tb38215.x>
- Mul Fedele, M. L., López Gabeiras, M. D. P., Simonelli, G., Diez, J. J., Bellone, G. J., Cagliani, J., Larrateguy, L., Eiguchi, K., Golombek, D. A., Cardinali, D. P., Pérez-Chada, D., & Vigo, D. E. (2023). "Multivariate analysis of the impact of sleep and working hours on medical errors : A MICE approach". *BMC Public Health*, 23(1), 2317. <https://doi.org/10.1186/s12889-023-17130-4>
- Mulder, G., & Mulder—Hajonides Van Der Meulen, W. R. E. H. (1973). Mental Load and the Measurement of Heart Rate Variability. *Ergonomics*, 16(1), 69-83.
<https://doi.org/10.1080/00140137308924483>

- Müller, T., & Apps, M. A. J. (2019). Motivational fatigue : A neurocognitive framework for the impact of effortful exertion on subsequent motivation. *Neuropsychologia*, *123*, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.04.030>
- O’Keeffe, K., Hodder, S., & Lloyd, A. (2020). A comparison of methods used for inducing mental fatigue in performance research : Individualised, dual-task and short duration cognitive tests are most effective. *Ergonomics*, *63*(1), 1-12. <https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1687940>
- Pageaux, B., & Lepers, R. (2016). Fatigue Induced by Physical and Mental Exertion Increases Perception of Effort and Impairs Subsequent Endurance Performance. *Frontiers in Physiology*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00587>
- Perna, G., Riva, A., Defillo, A., Sangiorgio, E., Nobile, M., & Caldirola, D. (2020). Heart rate variability : Can it serve as a marker of mental health resilience? *Journal of Affective Disorders*, *263*, 754-761. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2019.10.017>
- Pessiglione, M., Blain, B., Wiehler, A., & Naik, S. (2025). Origins and consequences of cognitive fatigue. *Trends in Cognitive Sciences*, *29*(8), 730-749. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2025.02.005>
- Phillips, R. O. (2015). A review of definitions of fatigue – And a step towards a whole definition. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *29*, 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.01.003>
- Ricci, J. A., Chee, E., Lorandeanu, A. L., & Berger, J. (2007). Fatigue in the U.S. Workforce : Prevalence and Implications for Lost Productive Work Time: *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, *49*(1), 1-10. <https://doi.org/10.1097/01.jom.0000249782.60321.2a>
- Schaffarczyk, M., Rogers, B., Reer, R., & Gronwald, T. (2022). Validity of the Polar H10 Sensor for Heart Rate Variability Analysis during Resting State and Incremental

- Exercise in Recreational Men and Women. *Sensors*, 22(17), 6536.
<https://doi.org/10.3390/s22176536>
- Scherr, J., Wolfarth, B., Christle, J. W., Pressler, A., Wagenpfeil, S., & Halle, M. (2013). Associations between Borg's rating of perceived exertion and physiological measures of exercise intensity. *European Journal of Applied Physiology*, 113(1), 147-155.
<https://doi.org/10.1007/s00421-012-2421-x>
- Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*, 5, 258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
- Skau, S., Sundberg, K., & Kuhn, H.-G. (2021). A Proposal for a Unifying Set of Definitions of Fatigue. *Frontiers in Psychology*, 12, 739764.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.739764>
- Smith, M. R., Zeuwts, L., Lenoir, M., Hens, N., De Jong, L. M. S., & Coutts, A. J. (2016). Mental fatigue impairs soccer-specific decision-making skill. *Journal of Sports Sciences*, 34(14), 1297-1304. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1156241>
- Souron, R., Morel, J., Gergelé, L., Infantino, P., Brownstein, C. G., Lapole, T., & Millet, G. Y. (2021). Relationship between intensive care unit-acquired weakness, fatigability and fatigue : What role for the central nervous system? *Journal of Critical Care*, 62, 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2020.11.019>
- Tanaka, M., Mizuno, K., Tajima, S., Sasabe, T., & Watanabe, Y. (2009). Central nervous system fatigue alters autonomic nerve activity. *Life Sciences*, 84(7-8), 235-239.
<https://doi.org/10.1016/j.lfs.2008.12.004>
- Thayer, J. F., & Lane, R. D. (2009). Claude Bernard and the heart–brain connection : Further elaboration of a model of neurovisceral integration. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(2), 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.08.004>

- Tornero-Aguilera, J. F., Jimenez-Morcillo, J., Rubio-Zarapuz, A., & Clemente-Suárez, V. J. (2022). Central and Peripheral Fatigue in Physical Exercise Explained : A Narrative Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(7), 3909. <https://doi.org/10.3390/ijerph19073909>
- Van Cutsem, J., Marcora, S., De Pauw, K., Bailey, S., Meeusen, R., & Roelands, B. (2017). The Effects of Mental Fatigue on Physical Performance : A Systematic Review. *Sports Medicine*, *47*(8), 1569-1588. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0672-0>
- Van Der Linden, D. (2011). The urge to stop : The cognitive and biological nature of acute mental fatigue. In P. L. Ackerman (Éd.), *Cognitive fatigue : Multidisciplinary perspectives on current research and future applications*. (p. 149-164). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/12343-007>
- Wang, Y., Huang, Y., Gu, B., Cao, S., & Fang, D. (2023). Identifying mental fatigue of construction workers using EEG and deep learning. *Automation in Construction*, *151*, 104887. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104887>
- Wascher, E., Rasch, B., Sängler, J., Hoffmann, S., Schneider, D., Rinkebauer, G., Heuer, H., & Gutberlet, I. (2014). Frontal theta activity reflects distinct aspects of mental fatigue. *Biological Psychology*, *96*, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.11.010>
- Wensink, M., Schaap, G., Ten Klooster, P. M., Doggen, C. J. M., Van Der Palen, J., Vonkeman, H. E., & Bode, C. (2023). Physical and mental fatigue in post-COVID syndrome and their associations over time : A small-sample ESM-study to explore fatigue, quality of sleep and behaviours. *Journal of Psychosomatic Research*, *164*, 111084. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2022.111084>
- Wiehler, A., Branzoli, F., Adanyeguh, I., Mochel, F., & Pessiglione, M. (2022). A neuro-metabolic account of why daylong cognitive work alters the control of economic

decisions. *Current Biology*, 32(16), 3564-3575.e5.

<https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.07.010>

Yamashita, S., Iwai, K., Akimoto, T., Sugawara, J., & Kono, I. (2006). Effects of music during exercise on RPE, heart rate and the autonomic nervous system. *Journal of sports medicine and physical fitness*, 46(3), 425.

Zhang, Z., Ning, H., & Zhou, F. (2022). A Systematic Survey of Driving Fatigue Monitoring.

IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 23(11), 19999-20020.

<https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3189346>

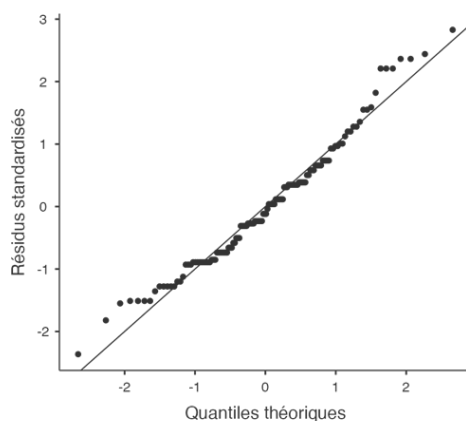
10. Annexes

Annexe 1. Test de Shapiro-Wilk – scores delta VAS

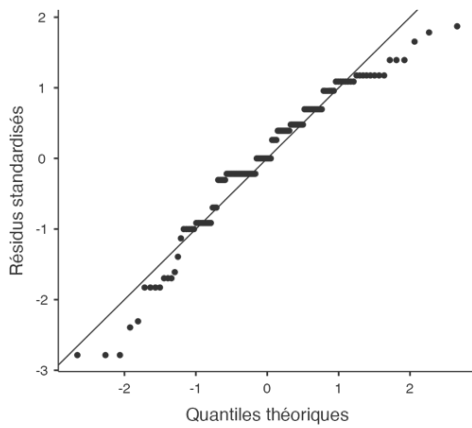
Statistiques descriptives

	delta_RMSSD_ ms	delta_LF_ms .2	delta_VASE M	delta_VASE P	delta_VASF M	delta_VASF P
N	15	15	15	15	15	15
Manquants	0	0	0	0	0	0
Moyenne	-0.398	-8.34	1.20	2.00	0.467	3.07
Médiane	-0.223	-6.02	1.00	2.00	0.00	3.00
Ecart-type	0.687	8.44	1.37	1.93	1.73	1.53
Minimum	-1.99	-30.4	0.00	0.00	-3.00	0.00
Maximum	0.440	-0.151	4.00	5.00	4.00	5.00
W de Shapiro-Wilk	0.931	0.857	0.797	0.851	0.957	0.912
Valeur p de Shapiro-Wilk	0.283	0.022	0.003	0.018	0.632	0.145

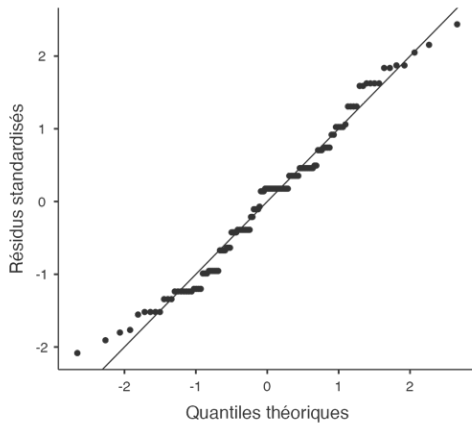
Annexe 2. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VAS EM



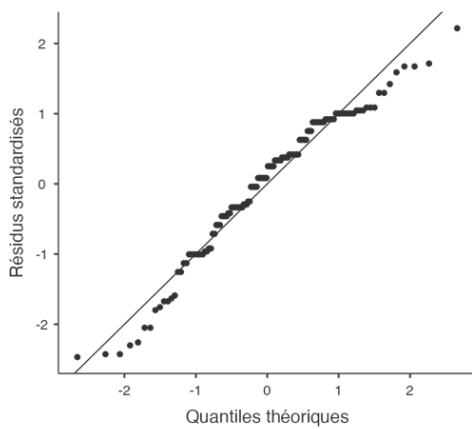
Annexe 3. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VAS EP



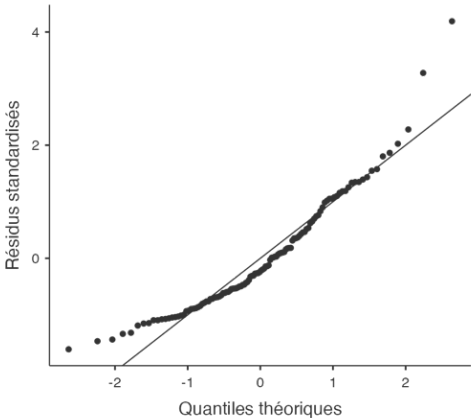
Annexe 4. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VAS FM



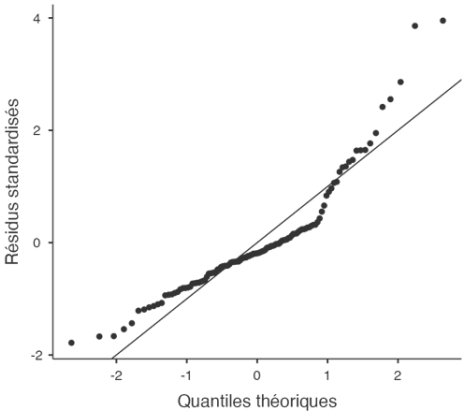
Annexe 5. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VAS FP



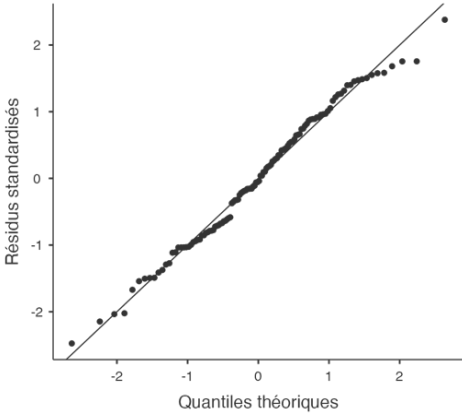
Annexe 6. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VFC RMSSD



Annexe 7. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VFC LF



Annexe 8. Graphiques Q-Q des résidus - ANOVAs – VFC SampEn



Annexe 9. Grille d'utilisation de l'intelligence artificielle

Dans ce cours, l'utilisation des IA Génératives pour ...	Utilisation autorisée	Utilisation de l'étudiant	Nom de/des IA générative(s) utilisée(s)
Aider à la rédaction du plan et de la structure du travail	✓		
Vérifier l'orthographe et la grammaire	✓		
Reformuler le contenu de votre travail ou améliorer le style	✓	✓	Claude
Traduire une autre langue	✓	✓	Gemini
Aider à la planification et gestion de projet	✓		
Obtenir des informations générales sur un sujet, expliquer et approfondir la compréhension de concepts	✓	✓	Claude
Faire un brainstorming et évaluer ses propres idées, pour trouver d'autres perspectives ou des contre-arguments	✓		
Aider à la recherche documentaire	✓	✓	Claude
Aider à la synthèse de la littérature	✓	✓	Gemini
Aider à la formulation de questions de recherche et d'hypothèses	✓		
Aider à l'analyse de données (identification d'analyses à réaliser)	✓		
Aider à l'interprétation des résultats	✓	✓	Claude
Aider au respect des normes APA de la liste des références	✓		
Aider à la programmation de code et au débogage	✓	✓	Claude
Générer un feedback critique et révision	✓		
Créer du contenu multimédia, par exemple des images, des vidéos, des animations ou du son (mais toujours expliquer l'utilisation des IA)	✓		