

Université de Montréal

Comparer l'expérience de la fatigue induite par l'effort physique et mental : une approche mixte
alliant quantitatif et qualitatif

Par

Camille Féral-Basin

École de Kinésiologie et des Sciences de l'Activité Physique, Faculté de Médecine

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M. Sc)
en Sciences de l'Activité Physique

Avril 2022

© Camille Féral-Basin, 2022

Université de Montréal

École de Kinésiologie et des Sciences de l'Activité Physique, Faculté de Médecine

Ce mémoire intitulé

Comparer l'expérience de la fatigue induite par l'effort physique et mental : une approche mixte alliant quantitatif et qualitatif

Présenté par

Camille Féral-Basin

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes

Daniel Gagnon

Président-rapporteur

Benjamin Pageaux

Directeur de recherche

Jeffrey G. Caron

Codirecteur

Isabelle Doré

Membre du jury

Résumé

Objectif : La fatigue est vécue par tous au quotidien. Elle se caractérise par une augmentation du sentiment d'épuisement et/ou une diminution des performances. On distingue la fatigue mentale (FM) de la fatigue physique (FP). Cette étude de cas multiples vise à examiner la relation entre les marqueurs objectifs et subjectifs de fatigue, et de les confronter au point de vue du participant.

Méthodes : Notre étude a été menée en utilisant des méthodes mixtes afin d'explorer l'expérience de la fatigue. La partie quantitative de l'expérience a permis d'induire de la FM et de la FP chez quatre participants. Ils ont également complété une batterie de tests de performance physique et cognitive avant et après la condition fatigante. La partie qualitative, une entrevue individuelle semi-structurée, a permis d'explorer l'expérience de la fatigue, la perception de l'effort et la performance vécue lors des deux sessions expérimentales. D'autres méthodes de collecte de données (enregistrements vidéo et PhotoVoice) ont permis de susciter la réflexion et d'alimenter l'entrevue.

Résultats : En utilisant la définition opérationnelle de la fatigue, les données quantitatives montrent que la FM (n=3) et FP (n=1) ont été induite seulement chez certains participants. Cependant, les données qualitatives diffèrent, une participante attestant avoir été fatiguée par la FP (n=1). L'analyse thématique révèle par ailleurs des différences entre l'expérience vécue en laboratoire (via les données quantitatives) et l'expérience ressentie (via les données qualitatives).

Conclusion : Les résultats de cette étude suggèrent une contradiction entre les définitions des concepts de FP et FM et les données quantitatives et qualitatives utilisées pour la quantifier.

Mots-clés : méthodes mixtes, fatigue induite par un effort mental, fatigue induite par un effort physique, performance, perception de l'effort

Abstract

Aim: Fatigue is experienced by everyone daily. It is characterized by increased feelings of tiredness and/or a decrease in performance. Mental fatigue (MF) can be distinguished from physical fatigue (PF). This multiple case study aims to examine the relationship between objective and subjective markers of fatigue and to investigate fatigue from the participant's perspective.

Methods: Our study was conducted using mixed methods to explore the experience of fatigue. The quantitative part of the experiment induced MF and PF in four participants. They also completed a battery of physical and cognitive performance tests before and after the fatiguing condition. The qualitative part, a semi-structured individual interview, explored the experience of fatigue, perception of effort, and performance experienced during the two experimental sessions. Participants were also asked to reflect their experience using methods such as video recordings and PhotoVoice.

Results: Using the operational definition of fatigue, quantitative data show that MF (n=3) and PF (n=1) were induced in some participants. However, qualitative data differed, with one participant attesting to having been fatigued by FP (n=1). Thematic analysis also revealed differences between the reported quantitative data collected in the laboratory and the reported qualitative data collected through the interview.

Conclusion: The results of this study suggest a contradiction between the definitions of the concepts of PF and MF and the quantitative and qualitative data used to quantify it.

Keywords: Mixed-methods, fatigue induced by mental exertion, fatigue induced by physical exertion, performance, perception of effort

Table des matières

Résumé.....	5
Abstract	7
Table des matières	9
Liste des tableaux.....	13
Liste des figures.....	15
Liste des sigles et abréviations.....	19
Remerciements	21
Avant-propos.....	23
Chapitre 1 – Cadre théorique.....	27
1. Qu’est-ce que la fatigue ?	27
1.1. La fatigue dans la littérature scientifique	28
1.1.1 La fatigue en sciences de l’activité physique	29
1.1.2 La fatigue en neurosciences et en psychologie.....	32
1.2 Notre approche : fatigue induite par un effort physique et mental.....	33
1.2.1 La fatigue induite par un effort physique	35
1.2.2 La fatigue induite par un effort mental.....	36
2. Comment induire et mesurer la fatigue en condition de laboratoire	37
2.1 Induire la fatigue par un effort mental	37
2.2 Induire la fatigue par un effort physique	40
2.3 Mesurer la fatigue induite par un effort physique et/ou mental	41
2.3.1 Mesures subjectives.....	41
2.3.2 Mesures objectives	43

3.	Effets de la fatigue sur les performances.....	44
3.1.	Effets de la fatigue sur les performances cognitives	44
3.1.1.	Fatigue induite par un effort mental et performances cognitives.....	44
3.1.2.	Fatigue induite par un effort physique et performances cognitives	46
3.2	Effets de la fatigue sur les performances physiques.....	49
3.2.1	Fatigue induite par un effort mental et performances physiques.....	49
3.2.1.1	Performances d’endurance.....	49
3.2.1.2	Production de force, puissance et vitesse maximale.....	50
3.2.1.3	Performances psychomotrices.....	51
3.2.2	Fatigue induite par un effort physique et performances physiques	53
3.2.2.1	Performance d’endurance	53
3.2.2.2	Production de force, puissance et vitesse maximale.....	54
3.2.2.3	Performances psychomotrices.....	55
3.3	Conclusion	56
4.	Fatigue et perception de l’effort.....	57
4.1	Définition et mesure de la perception de l’effort	58
4.2	Neurophysiologie de l’effort	59
5.	Objectif de ce mémoire.....	60
Chapitre 2 – Article (à soumettre).....		62
Abstract		63
1.	Introduction.....	64
2.	Methods	67
3.	Results	77
4.	Discussion.....	99

Chapitre 3 – Conclusion et perspectives.....	109
Conclusion	109
Perspectives	111
Références bibliographiques.....	113
Annexes	127

Liste des tableaux

Table 1.	<i>Participants' Characteristics</i>	68
Table 2.	<i>Participant 1: Endurance-Trained Male's Fatiguing Tasks Data</i>	82
Table 3.	<i>Participant 2: Active Male's Fatiguing Tasks Data</i>	87
Table 4.	<i>Participant 3: Active Female's Fatiguing Tasks Data</i>	92
Table 5.	<i>Participant 4: Non-Active Female's Fatiguing Tasks Data</i>	98

Liste des figures

Figure 1.	Taxonomie proposée par Enoka et Duchateau (2016)	31
Figure 2.	Modèle de la fatigue motivationnelle par Muller et Apps (2019)	32
Figure 3.	Représentation théorique de l'effet de la fatigue mentale sur la perception de l'effort lors d'une épreuve de temps d'endurance. Tiré de Pageaux et al. (Soumis, en révision).....	34
Figure 4.	Illustration d'une tâche de Stroop.	39
Figure 5.	Illustration d'une tâche AX-CPT.	40
Figure 6.	Différentes mesures subjectives.	42
Figure 7.	Synthèse des effets de la fatigue sur les performances cognitives.	48
Figure 8.	Synthèse des effets de la fatigue sur les performances physiques.	56
Figure 9.	Synthèse des méthodes d'induction, des outils d'évaluation et des effets sur les performances physiques.	57
Figure 10.	Échelles de perception de l'effort, extraite de Borg et Kaijser (2006).....	59
Figure 11.	Modèle des afférences musculaires et modèle de la décharge corollaire	60
Figure 12.	69
	<i>Panel A: Overview of the Study Procedure.</i>	69
	<i>Panel B: Graphical Overview of the Experimental Protocol.</i>	69
Figure 13.	78
	<i>(Panel A) Participant 1: Endurance-Trained Male's Evolution of the Perception of Effort During Each 20-minute Block</i>	78
	<i>(Panel B) Participant 1: Endurance-Trained Male's Evolution of Perceived Activation and Affective Valence During Each 20-minute Block</i>	78
	<i>(Panel C) Participant 1: Endurance-Trained Male's Subjective Workload (NASA-TLX)</i>	78
Figure 14.	79
	<i>Participant 1: Endurance-Trained Male's PhotoVoice for Mental Exertion Session (Panel A) and Physical Exertion Session (Panel B)</i>	79
Figure 15.	81

<i>Participant 1: Endurance-Trained Male’s Boredom and Fatigue Reports During Physical Exertion Task (Panel A) and During Mental Exertion Task (Panel B)</i>	81
Figure 16	84
<i>Participant 2: Active Male’s Boredom and Fatigue Reports During Physical Exertion Task (Panel A) and During Mental Exertion Task (Panel B)</i>	84
Figure 17	85
<i>(Panel A) Participant 2: Active Male’s Evolution of the Perception of Effort During Each 20-minute Block</i>	85
<i>(Panel B) Participant 2: Active Male’s Evolution of Perceived Activation and Affective Valence During Each 20-minute Block</i>	85
<i>(Panel C) Participant 2: Active Male’s Subjective Workload (NASA-TLX)</i>	85
Figure 18	88
<i>Participant 3: Active Female’s Boredom and Fatigue Reports During Physical Exertion Task (Panel A) and During Mental Exertion Task (Panel B)</i>	88
Figure 19	88
<i>Participant 3: Active Female’s PhotoVoice for Mental Exertion Session (Panel A) and Physical Exertion Session (Panel B)</i>	89
Figure 20	90
<i>(Panel A) Participant 3: Active Female’s Evolution of the Perception of Effort During Each 20-minute Block</i>	90
<i>(Panel B) Participant 3: Active Female’s Evolution of Perceived Activation and Affective Valence During Each 20-minute Block</i>	90
<i>(Panel C) Participant 3: Active Female’s Subjective Workload (NASA-TLX)</i>	90
Figure 21	93
<i>(Panel A) Participant 4: Non-Active Female’s Evolution of the Perception of Effort During Each 20-minute Block</i>	93
<i>(Panel B) Participant 4: Non-Active Female’s Evolution of Perceived Activation and Affective Valence During Each 20-minute Block</i>	93
<i>(Panel C) Participant 4: Non-Active Female’s Subjective Workload (NASA-TLX)</i>	93

Figure 22......94
Participant 4: Non-Active Female’s Boredom and Fatigue Reports During Physical Exertion Task (Panel A) and During Mental Exertion Task (Panel B).....94

Figure 23......95
Participant 4: Non-Active Female’s PhotoVoice for the Mental Task.....95

Figure 24......96
Participant 4: Non-Active Female’s PhotoVoice for the Physical Task.....96

Liste des sigles et abréviations

bpm: beats per minute

BR: breathing rate

EMG: signal électromyographique

HR: heart rate

HR_{th-max}: theoretical maximum heart rate

Hz: Hertz

MF: mental fatigue

ms: milliseconds

MVC: maximal voluntary contractions

N: Newton

NASA-TLX: National Aeronautics and Space Administration Task Load Index

PE: perception de l'effort

PF: physical fatigue

rpm: round per minute

s: seconds

SNC : Système nerveux central

VAS: visual analog scale

W: Watts

Remerciements

À mes directeurs de recherche, Benjamin Pageaux et Jeffrey Caron. Merci pour cette opportunité, nos discussions et vos retours constructifs.

Aux participants qui ont accepté de se faire fatiguer et de me partager leur expérience, merci ! Sans vous, je n'aurais pu réaliser ce projet de maîtrise.

À mes KinLadies et Maxime. Merci pour votre aide, votre écoute et vos encouragements. Merci d'avoir partagé mes montagnes russes d'émotions.

À mes amies et amis. Merci pour votre support continu et votre écoute. Merci pour les soupers, les sorties, les discussions enrichissantes et nos rigolades !

À l'équipe d'ophtalmologie du CHUM et à tous ceux et celles qui, de près ou de loin, ont contribué à sauver ma vision, merci. Je n'ai jamais sous-estimé le plaisir de voir, mais je la chéris encore plus aujourd'hui.

À mes scoutesses et à mes athlètes. Merci pour tous ces moments rafraîchissants dans mon quotidien !

À ma famille, merci pour tout. Sans vous, je serai encore au début de ce long tunnel.

Avant-propos

Nous vivons toutes et tous de la fatigue au quotidien, que ce soit après une journée de travail, d'étude ou après une séance d'activité physique. La fatigue est définie par le dictionnaire Oxford comme « un sentiment de fatigue extrême résultant d'un effort physique ou mental ou d'une maladie » et/ou une « diminution de l'efficacité d'un muscle ou d'un organe après une activité prolongée » (traduction libre) (Oxford). Cette définition axe la fatigue à partir de deux composantes, l'une subjective (i.e., sentiment de fatigue) et l'autre objective (i.e., diminution de l'efficacité d'un muscle ou d'un organe), une perspective que nous adopterons tout au long de ce mémoire.

La communauté scientifique en science du sport s'entend pour distinguer la fatigue induite par un effort mental de la fatigue induite par un effort physique. La fatigue induite par un effort physique réfère à une diminution transitoire de la capacité à effectuer des actions physiques (Enoka et Duchateau, 2008; Gandevia, 2001) et se caractérise par une diminution de la production de force (Gandevia, 2001). La fatigue induite par un effort mental est un état psychobiologique causé par des périodes prolongées d'activités cognitives exigeantes et se caractérise, entre autres, par une augmentation du sentiment de fatigue et un manque d'énergie (Boksem et Tops, 2008). La fatigue, autant mentale que physique, peut avoir des répercussions sur des tâches physiques (Marcora et al., 2008; Marcora et al., 2009). La fatigue induite par un effort mental a également des conséquences sur les performances cognitives (van der Linden et Eling, 2006). En ce qui trait à la fatigue induite par un effort physique, un certain nombre de facteurs modérateurs sont à considérer (détails dans la section 3.1.2), mais globalement les performances cognitives en présence de fatigue physique, sont marqués par un petit effet positif (Chang et al., 2012). La seule variable commune à la fatigue induite par un effort physique et mental est la perception de l'effort.

Il semble important de préciser le type de fatigue dont il sera question dans ce mémoire. La fatigue aiguë, provoquée par un effort physique ou mental, une condition passagère et réversible par le repos, se distingue de la fatigue chronique résultant de la vieillesse ou d'une maladie (cancer, fibromyalgie, syndrome de fatigue chronique, etc.). Dans ce mémoire, nous traitons uniquement de fatigue aiguë.

La majorité des recherches sur la fatigue ont examiné ce phénomène en silo, c'est-à-dire en s'intéressant à un seul type de fatigue (mentale ou physique). Plus récemment, des études « croisées » se sont intéressées à l'impact de la fatigue mentale sur une tâche physique et à l'impact de la fatigue physique sur une tâche mentale. Les recherches mettant rarement en relation la composante subjective avec les altérations objectives, il est intéressant d'intégrer l'impact de la fatigue induite par un effort physique et mental au sein d'un même projet, afin de mieux comprendre la fatigue chez le participant sain.

Initialement, mon étude s'intéressait à comprendre l'expérience de la fatigue autant chez les individus non-actifs que chez les individus actifs ainsi que les athlètes entraînés en endurance. Un total de douze participants et quatre visites en laboratoire étaient prévus. Le nombre de participants aurait probablement permis d'atteindre une saturation des données qualitatives alors que l'ajout d'une quatrième visite aurait permis la passation d'un test d'effort maximal ($VO_2\text{max}$). Toutefois, la pandémie COVID-19 m'aura forcé à apporter des changements majeurs à mon protocole. Non seulement la collecte des données a été repoussée de plus d'un an, mais les mesures restrictives en place m'ont également amené à passer à une étude pilote. De cette façon, mon recrutement s'est limité à quatre participants (une femme non-active, une femme active, un homme actif et un homme entraîné en endurance) et le test d'effort maximal a été mis de côté. Nous avons adapté notre protocole en nous fiant à certaines données théoriques. Effectivement, au lieu d'utiliser un pourcentage de la $VO_2\text{max}$ ou du pic de puissance aérobie, pour induire une fatigue physique, un pourcentage de la fréquence cardiaque théorique maximale a plutôt été utilisé.

Mes années d'études aux cycles supérieurs m'auront également permis d'élargir mes connaissances du milieu de la recherche. J'ai eu la chance de contribuer à trois projets de recherche dont deux articles scientifiques sont en cours de publication. Le premier projet (non publié) s'est déroulé à l'Institut national du sport du Québec en collaboration avec l'équipe d'espoirs en patinage de vitesse courte piste. Ce projet fort enrichissant m'aura permis de participer à une première collecte de données et à l'analyse individuelle de données. Par la suite, j'ai eu la chance de réaliser une collecte de données complètes (n=20) dans le cadre d'un projet cherchant à tester la possibilité d'utiliser l'échelle CR100 pour mesurer la perception de l'effort au cours de tâches motrices impliquant les membres supérieurs (article soumis, Payen de la Garanderie et al.). J'ai également participé à une revue systématique avec méta-analyse (article en révision, Bergevin et al., 2021), notamment en m'impliquant sur l'analyse qualitative des données. Cette dernière expérience m'aura fait comprendre l'importance de bien respecter la définition d'un construit dans la littérature scientifique (ici, la perception de l'effort) afin d'éviter que des facteurs confondants soient mélangés au construit étudié (ex., douleur, inconfort) et ainsi augmenter la rigueur scientifique d'une recherche et la justesse de ses résultats.

Ce mémoire a pour objectif principal de mieux comprendre la fatigue induite par un effort mental et physique chez le sujet sain. Pour répondre à cet objectif, ce mémoire présentera d'abord une revue de la littérature sur la fatigue en prenant bien soin de distinguer la fatigue induite par un effort physique de la fatigue induite par un effort mental (section 1). La façon d'induire et la quantification de la fatigue (section 2) ainsi que les effets de la fatigue sur les performances (section 3) seront également présentés dans la revue de littérature. Par la suite, la partie expérimentale (quantitative) et exploratoire (qualitative) de mon étude sera présentée sous forme d'article scientifique et détaillera le protocole expérimental, les données collectées ainsi que les résultats obtenus dans le cadre de ce projet de recherche. Finalement, le dernier chapitre servira de conclusion.

Chapitre 1 – Cadre théorique

1. Qu'est-ce que la fatigue ?

D'abord mises de l'avant il y a plus d'un siècle (Mosso, 1906), les études sur la fatigue se sont faites nombreuses dans la dernière décennie. Plusieurs facteurs peuvent influencer l'expérience de la fatigue comme la durée, l'intensité, le type d'exercice ou même les muscles impliqués dans la tâche (Ament et Verkerke, 2009). La fatigue est étudiée dans une panoplie de disciplines, par exemple en sciences infirmières (Coetzee et Klopper, 2010), dans le domaine médical (Kluger et al., 2016), en psychologie (Aitken et MacMahon, 2019) ou encore en sciences de l'activité physique (Marcora et al., 2009). Du fait de toutes ces influences, trouver une définition universelle est difficile si ce n'est impossible. Depuis qu'elle est étudiée, les définitions de la fatigue se sont multipliées (pour références, R. O. Phillips, 2015; S. Phillips, 2015; Tiesinga et al., 1996). La majorité de ces définitions sont pourtant semblables; elles mettent de l'avant la diminution de la capacité à maintenir ou à générer une force maximale, représentant ainsi le côté physiologique de la fatigue. Pourtant, la fatigue contient une composante psychologique tout aussi importante.

La fatigue peut donc se caractériser autant par des manifestations subjectives ou psychologiques (p. ex, sentiment de fatigue) que par des données objectives ou physiologiques (p. ex, diminution de l'efficacité d'un muscle). C'est pour cette raison que la définition du dictionnaire Oxford est celle que nous trouvons la plus juste puisqu'elle met l'accent sur ces deux modalités. La fatigue y est définie comme « un sentiment de fatigue extrême résultant d'un effort physique ou mental ou d'une maladie » et/ou une « diminution de l'efficacité d'un muscle ou d'un organe après une activité prolongée » (traduction libre). La communauté scientifique s'entend pour distinguer la fatigue induite par un effort physique de la fatigue induite par un effort mental. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons à la fatigue induite par un effort physique ou mental, une condition réversible avec le temps et en se reposant, et non pas à la fatigue résultant d'une maladie.

En plus du nombre grandissant de définitions, les scientifiques utilisent différentes terminologies pour faire référence à la fatigue.

Quelle différence entre la fatigue mentale et la fatigue cognitive? Ces deux termes ont été utilisés pour référer à un phénomène supposé similaire. Ackerman et Kanfer (2009) définissent la *fatigue cognitive* comme un état subjectif dans lequel la performance au travail diminue après une période prolongée d'exécution d'une tâche cognitive. Ces deux auteurs, appuyés entre autres par MacMahon et al. (2014) et Aitken et MacMahon (2019), privilégient le terme de fatigue cognitive puisqu'ils le trouvent plus précis dans un contexte de psychologie cognitive. Par ailleurs, les tâches utilisées dans l'induction de fatigue étant de nature cognitive, ils trouvent ce terme reflétant mieux leur réalité. Or, les chercheurs en sciences de l'activité physique préfèrent utiliser le terme de fatigue mentale puisque celui-ci inclut non seulement l'aspect cognitif, mais aussi les émotions et la motivation, des facteurs exerçant une influence sur le sentiment de fatigue (Van Cutsem et al., 2017).

À la différence des termes référant à la fatigue induite par un effort mental, aucune distinction ne semble être faite entre la *fatigue physique* et la *fatigue (neuro)musculaire*. Ces termes sont définis de manière semblable et réfèrent à une diminution des capacités physiques induite par un effort physique.

Comme sa définition l'indique, la fatigue résulte d'un effort. Cet effort mental (ou physique) est l'engagement prolongé dans une tâche cognitive (ou physique) exigeante (Pageaux et Lepers, 2016). Cet engagement prolongé lorsqu'il est suffisamment intense peut induire de la fatigue. C'est dans cet esprit que nous choisissons de parler de fatigue induite par un effort mental ou physique plutôt que de parler de fatigue mentale et de fatigue physique.

1.1. La fatigue dans la littérature scientifique

Au cours des années, différents scientifiques ont tenté d'expliquer d'où provient la fatigue. Deux conceptualisations différentes s'affrontent : les modèles en sciences de l'activité physique,

davantage axés sur une perspective physiologiste et les modèles en psychologie et en neurosciences, davantage axés sur une perspective cognitive.

1.1.1 La fatigue en sciences de l'activité physique

Les études en sciences de l'activité physique se sont davantage intéressées à l'origine de la fatigue neuromusculaire qui correspond à une diminution de la force maximale ou de la production de puissance (Gandevia, 2001). Plus particulièrement, ils s'y sont intéressés dans un contexte de performance en endurance jusqu'à épuisement. Un individu met fin à un exercice d'endurance lorsque son système musculaire n'est plus capable de produire la vitesse/puissance requise par la tâche malgré un effort volontaire maximal (Allen et al., 2008; Burnley et Jones, 2018). La perte de force et/ou de puissance caractérisant la fatigue neuromusculaire est expliquée par des altérations centrales (c'est-à-dire une réduction progressive de l'activation volontaire du muscle pendant l'exercice ; Gandevia, 2001) et périphériques (c'est-à-dire des changements au niveau de la jonction neuromusculaire ou après ; Allen et al., 2008). Ces altérations sont interdépendantes, ainsi la fatigue périphérique exerce une influence sur la fatigue centrale (Millet, 2010). Une commande provenant du système nerveux central (SNC) doit être envoyée au muscle pour que celui-ci se contracte.

La fatigue périphérique affecte directement le muscle et réfère à des changements au niveau de la jonction neuromusculaire ou après celle-ci, altérant les propriétés contractiles des muscles actifs (Allen et al., 2008). En présence de fatigue neuromusculaire, la performance serait limitée en raison du retour afférent effectué par les fibres des groupes III et IV (Allen et al., 2008). Cependant, cette explication est insuffisante à elle seule pour expliquer la fatigue musculaire puisque Marcora et Staiano (2010) ont démontré que des participants étaient capables de produire une quantité de puissance significativement plus élevée à la suite d'un test d'épuisement.

De son côté, la fatigue centrale est associée à des facteurs qui résident dans le SNC au niveau spinal (i.e., moelle épinière) ou supra-spinal (i.e., cerveau). Elle est définie comme une diminution du niveau d'activation volontaire maximale induite par l'exercice (Gandevia, 2001). Plusieurs mécanismes tels qu'un manque d'oxygénation du cerveau ou encore des changements neurochimiques et thermodynamiques de l'homéostasie cérébrale pourraient conduire à une fatigue centrale (Pattyn et al., 2018). Lorsque la commande neuronale provenant du SNC est réduite, cela peut diminuer l'activité contractile du muscle et ainsi réduire la production de force et de puissance, menant à la fatigue neuromusculaire et à l'altération des performances (Taylor et al., 2016).

Ce premier modèle (fatigue centrale vs périphérique) explique de façon précise la physiologie de la fatigue, mais présente tout de même une limite majeure. Étant purement physiologique, ce modèle ne prend pas en considération ni ne permet d'expliquer la composante psychologique pouvant affecter les performances. Or, puisque la fatigue est définie par des variables subjectives et objectives, il est primordial que le modèle expliquant les performances prenne en considération ces deux composantes.

Enoka et Duchateau (2016) ont tenté d'adresser cette limite. Reprenant le travail de Kluger et al. (2013), ils proposent une taxonomie unifiée et simplifiée. Cette nouvelle taxonomie n'utilise plus d'adjectifs pour précéder le terme de fatigue (p. ex., centrale, périphérique, mentale, physique...), mais indique qu'il faut plutôt voir la fatigue comme un tout. Deux nouveaux termes sont donc proposés : la fatigabilité de la performance (i.e., performance fatigability) et la fatigabilité perçue (i.e., perceived fatigability) (voir Figure 1). La fatigabilité perçue fait référence aux états subjectifs alors que la fatigabilité de la performance est liée aux données objectives (Enoka et Duchateau, 2016; Kluger et al., 2013). Ce modèle adresse donc une première limite puisqu'il prend en considération à la fois la composante subjective de la fatigue en plus de la composante objective.

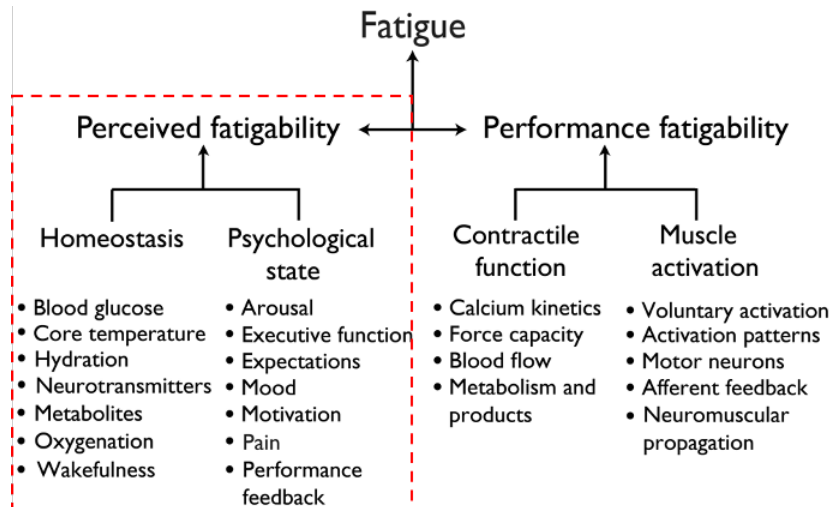


Figure 1. Taxonomie proposée par Enoka et Duchateau (2016)

La fatigabilité de la performance est décrite de façon précise et permet de bien comprendre les manifestations objectives de la fatigue. De son côté, la fatigabilité perçue inclut deux dimensions, soit l'homéostasie et les états psychologiques. Cette fatigabilité perçue réfère aux états subjectifs c'est-à-dire à ce qu'un individu peut ressentir et percevoir. Une perception c'est l'expérience consciente d'une sensation. Or, l'homéostasie n'est pas percevable par un individu. Elle peut expliquer certains états ressentis ou vécus, mais ne peut être vécue consciemment. Par ailleurs, les exemples énoncés sous « les états psychologiques » (p. ex : éveil, fonctions exécutives, douleur, performance feedback) sont également problématiques. Par exemple, les fonctions exécutives ne représentent pas un état psychologique. Il s'agit plutôt de processus cognitifs affectés en présence de fatigue. Encore une fois, aucun individu ne peut percevoir ses fonctions exécutives. Il en va de même pour le retour sur la performance, c'est plutôt une information analysée mentalement.

Ainsi, ce modèle n'est pas juste au niveau des composantes subjectives. Par conséquent, il semble intéressant de regarder les modèles proposés dans la littérature en psychologie et en neurosciences puisqu'ils sont le champ d'expertise des aspects psychologiques et motivationnels.

1.1.2 La fatigue en neurosciences et en psychologie

Des chercheurs en neurosciences et psychologie ont également tenté de déterminer l'origine de la fatigue. Certains systèmes cérébraux, notamment le cortex cingulaire antérieur dorsal, l'insula antérieure et le cortex préfrontal latéral, sont impliqués dans les mécanismes neuronaux à l'origine des changements comportementaux dus à la fatigue (Muller et Apps, 2019). Ces mêmes systèmes sont également liés à la motivation de l'effort, à la réalisation d'objectifs et au traitement des états internes (Muller et Apps, 2019). Lorsqu'un individu est fatigué, il évalue les coûts et les avantages d'investir un certain effort pour une tâche donnée. Ainsi, plus le sentiment de fatigue augmente, plus l'effort fourni dans une tâche diminue, entraînant une réduction des performances.

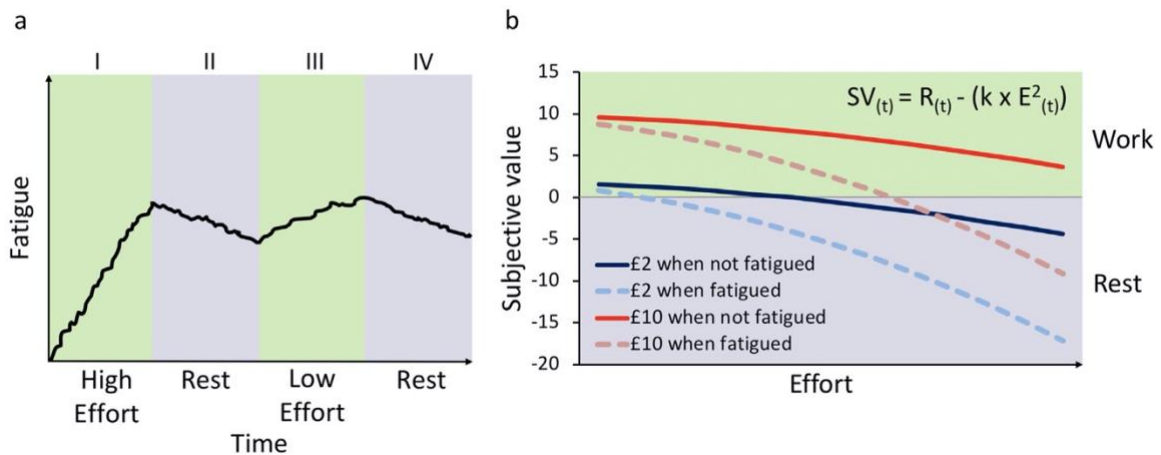


Figure 2. Modèle de la fatigue motivationnelle par Muller et Apps (2019)

Panel a : Effets prédits de l'effort et des repos sur la fatigue lors d'une tâche.

Panel b : Effets prédits de la fatigue sur la motivation ultérieure.

Dans leur modèle (Figure 2), Muller et Apps (2019) soutiennent que la motivation est modulée par la fatigue. Selon les deux auteurs, la motivation est caractérisée par une évaluation des coûts et des bénéfices, le coût de l'effort ayant un impact considérable sur la motivation et le niveau d'activité d'un individu. Cette théorie stipule que la fatigue augmente avec le temps pendant

l'effort (voir Figure 2a, temps I et III), et qu'elle diminue partiellement avec le repos (voir Figure 2a, temps II et IV). Par ailleurs, plus l'individu investit un haut niveau d'effort, plus le sentiment de fatigue augmente (voir Figure 2a, temps I versus III). Selon cette théorie, lorsqu'un individu est moins motivé, il dévalue les récompenses dans une plus grande mesure que lorsqu'il est motivé (voir Figure 2b). La valeur des récompenses est donc réduite subjectivement par les coûts de l'effort perçu par chaque individu, affectant les performances.

Contrairement aux modèles des physiologistes, le modèle de la fatigue motivationnelle ne s'intéresse qu'à une perspective subjective de la fatigue arguant que la motivation est en quelque sorte la clé de la performance. Or, autant les composantes objectives que les composantes subjectives doivent être prises en compte pour mesurer la fatigue. Pour ces raisons, un modèle considérant autant les composantes psychologiques que les composantes biologiques est essentiel. Le modèle psychobiologique (Marcora, 2019) répond à cette nécessité et s'inscrit dans notre vision. Il sera présenté dans la section suivante.

1.2 Notre approche : fatigue induite par un effort physique et mental

Le modèle psychobiologique de la performance d'endurance (Marcora, 2019) répond aux limites des modèles en sciences de l'activité physique et en psychologie et neurosciences puisqu'il prend en compte autant des facteurs biologiques que des facteurs psychologiques pour expliquer la performance. Basé sur la théorie de l'intensité motivationnelle (Brehm et Self, 1989; Wright, 2008), ce modèle propose qu'un individu régule sa performance en fonction de cinq facteurs : (1) la perception de l'effort, (2) la motivation potentielle, (3) la connaissance de la distance/temps à parcourir, (4) la connaissance de la distance/temps restant et (5) l'expérience antérieure (Marcora, 2010a). La perception de l'effort est définie comme la sensation consciente de la difficulté et de l'intensité d'une tâche (Marcora, 2009) et correspond à l'intensité de l'engagement dans une tâche alors que la motivation potentielle est l'effort maximal qu'une personne est prête à fournir pour réussir une tâche (Brehm et Self, 1989). Ainsi, lorsque l'effort requis dépasse la motivation potentielle, ou lorsque la perception de l'effort est si extrême que

poursuivre la tâche semble impossible, l'individu décide consciemment d'arrêter l'exercice, ou réduit son travail afin de s'adapter. Selon ce modèle de décision basé sur l'effort, tout facteur qui influence la perception de l'effort et/ou la motivation potentielle influence la performance d'endurance, même si la capacité physiologique à effectuer un exercice d'endurance reste inchangée.

Le modèle psychobiologique prend donc en considération deux composantes majeures, la motivation et la perception de l'effort qui peuvent influencer les capacités d'un individu à performer dans une tâche.

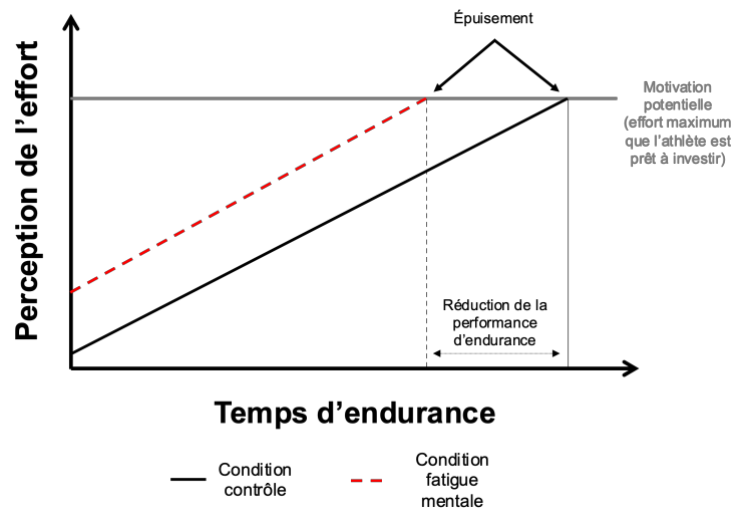


Figure 3. Représentation théorique de l'effet de la fatigue mentale sur la perception de l'effort lors d'une épreuve de temps d'endurance. Tiré de Pageaux et al. (Soumis, en révision)

1.2.1 La fatigue induite par un effort physique

Lorsqu'un individu s'entraîne, joue au soccer ou encore fait une randonnée pédestre, il est physiquement actif. Si son effort investi dans l'exercice est suffisamment intense et prolongé dans le temps, il se pourrait qu'il ressente un sentiment d'épuisement. Ce sentiment correspond à une manifestation subjective de la fatigue. Une augmentation du sentiment de fatigue (Ament et Verkerke, 2009) et de la perception de l'effort (Pageaux et Lepers, 2016) peuvent aussi être ressenties par un individu physiquement fatigué. Lorsqu'un individu doit garder une performance stable (i.e., une production motrice constante), sa perception d'effort augmentera graduellement avec le temps (Pageaux et Lepers, 2016). Lorsque la demande physique devient trop grande et que le sentiment de fatigue devient trop intense, un individu aura le choix de diminuer la charge de travail ou d'arrêter (Brehm et Self, 1989; Marcora, 2019).

De la même manière, cet individu pourrait ressentir une diminution de ses capacités de production de force des muscles impliqués dans l'exercice (Gandevia, 2001). Cette diminution correspond à une manifestation objective de la fatigue. Des changements au niveau comportemental et/ou au niveau physiologique peuvent également se manifester en présence de fatigue induite par un effort physique. Au niveau comportemental, elle peut entraîner une diminution de la performance sur une tâche physique subséquente (Marcora et al., 2008). Au niveau physiologique, la fatigue peut également se manifester par diverses réponses telles qu'une augmentation des réponses cardiorespiratoires (Marcora et al., 2008).

Bien que de nombreuses études se soient intéressées aux effets de la fatigue induite par un effort physique sur les performances cognitives (e.g. Brisswalter et al., 2002; Chang et al., 2012; Lambourne et Tomporowski, 2010), les résultats sont contrastés. Des chercheurs se sont également intéressés aux effets de la fatigue induite par un effort physique sur des performances physiques, ces études montrant une détérioration des performances en présence de fatigue (e.g. Amann et Dempsey, 2008; Enoka et Duchateau, 2008; Marcora et al., 2008; Missenard et al.,

2009; Pageaux et Lepers, 2016). Les effets de la fatigue induite par un effort physique sur les performances physiques et cognitives seront présentés plus en détail dans la section 3 du présent chapitre.

1.2.2 La fatigue induite par un effort mental

Lorsqu'un individu écoute activement un cours, lorsqu'il écoute un film dans une langue seconde ou encore lorsqu'il lit et tente de comprendre des articles scientifiques, il utilise de nombreuses ressources mentales. Si son effort investi dans la tâche est suffisamment intense et prolongé, il se pourrait qu'il ressente un sentiment d'épuisement. Ce sentiment correspond à une manifestation subjective de la fatigue (Pageaux et Lepers, 2018). Cette fatigue peut également se manifester par une diminution du niveau d'énergie ou de la motivation (Boksem et Tops, 2008) ou par des changements d'humeur (Holding, 1983). Lorsqu'un individu est mentalement fatigué, il tend à éviter de s'engager dans tout effort supplémentaire et à réduire son engagement dans la tâche (Holding, 1983; Meijman, 2000). Toutefois, certains facteurs, telle qu'une motivation accrue, peuvent contrecarrer les effets de la fatigue induite par un effort mental sur les performances. C'est ce qu'ont relevé Hopstaken et al. (2015) dans leur étude. En offrant un incitatif monétaire à la fin d'une tâche mentalement exigeante, ils ont constaté une augmentation de la performance cognitive malgré des signes antérieurs de fatigue mentale.

Objectivement, ce type de fatigue peut être caractérisé par des changements au niveau comportemental et/ou au niveau physiologique. Elle peut transparaître au niveau comportemental par une diminution de la performance sur une tâche subséquente, que celle-ci soit cognitive (van der Linden et al., 2003) ou physique (Marcora et al., 2009). Physiologiquement, la fatigue induite par un effort mental peut se manifester par une altération de l'activité cérébrale reflétant des processus de compensation dans le but de maintenir une performance (Jacquet et al., 2021; Wang et al., 2016). Lorsqu'un individu maintient une performance au détriment de

l'augmentation de son sentiment de fatigue, aucune réponse physiologique anormale n'a été présentement identifiée (Marcora et al., 2009; Pageaux et Lepers, 2018).

La relation entre la fatigue induite par un effort mental et les performances cognitives (Boksem et al., 2005; Lorist et al., 2000; van der Linden et al., 2003) et physiques (e.g. Marcora et al., 2009; Pageaux et al., 2013) a été le fruit de nombreuses recherches, et sera abordée plus en détail dans la section 3 du présent chapitre.

La fatigue, qu'elle soit induite par un effort physique ou mental, est progressive et peut s'observer par différents changements, autant objectifs que subjectifs (Pageaux et Lepers, 2018). Il n'est pas nécessaire d'avoir des changements dans ces deux sphères pour témoigner de la présence de fatigue (Van Cutsem et al., 2017).

2. Comment induire et mesurer la fatigue en condition de laboratoire

Plusieurs tâches expérimentales peuvent être utilisées en laboratoire pour induire de la fatigue. Un effort physique ou mental prolongé de plus de 30 minutes permet d'augmenter systématiquement la sensation de fatigue (Millet et Lepers, 2004; Pageaux et Lepers, 2016, 2018).

2.1 Induire la fatigue par un effort mental

Diverses tâches cognitives ont été utilisées pour induire de la fatigue mentale. Ces tâches regroupent une série de caractéristiques communes. Tout d'abord, la fatigue mentale peut être provoquée autant par l'exécution prolongée d'une seule tâche cognitive que par l'exécution de plusieurs activités mentalement exigeantes (van der Linden et al., 2003). Ensuite, la fatigue mentale étant causée par des périodes prolongées d'activités cognitives exigeantes, la durée de la tâche mentale est importante. Il est possible de maintenir une performance à une tâche cognitive pendant la première heure, mais celle-ci est souvent altérée au-delà de 60 minutes (Lorist et al., 2000). Néanmoins, Pageaux et Lepers (2016) indiquent qu'une performance

subséquente peut être altérée après seulement 30 minutes d'effort mental. Par ailleurs, il est recommandé d'utiliser une tâche sollicitant les fonctions exécutives puisqu'elles semblent plus exigeantes mentalement (Lorist et al., 2005). Ces fonctions étant utilisées dans notre vie quotidienne, autant lors de compétitions que lors d'une journée de travail, une tâche mentale les sollicitant permet de bien refléter la réalité. Les fonctions exécutives font partie de processus mentaux de haut niveau prenant en charge les comportements orientés vers un but et qui nous permettent de répondre de manière adaptative à l'environnement (Coulacoglou et Saklofske, 2017). Il existe trois fonctions exécutives principales, (1) l'inhibition, (2) la mémoire de travail et (3) la flexibilité cognitive. De ces trois fonctions exécutives en découlent plusieurs autres telles que la planification, la résolution de problème, le raisonnement, etc. (Diamond, 2013).

Un individu fatigué mentalement est capable de maintenir ses performances lors de tâches simples alors qu'elles se détériorent lors de tâches complexes (van der Linden et al., 2003). Dans leur recherche, Pageaux et al. (2014) ont comparé l'effet d'une tâche de Stroop congruente (tâche simple et automatique) à une tâche de Stroop non congruente (tâche requérant de l'inhibition, une fonction exécutive). Ils ont démontré qu'une tâche mentale faisant appel aux fonctions exécutives (ici la tâche de Stroop non congruente) semble augmenter la fréquence cardiaque moyenne et diminuer le temps de réaction.

Les deux tâches mentales utilisées le plus couramment sont la tâche non congruente de Stroop (Stroop, 1992) et la tâche de performance continue AX (AX-CPT, Carter et al., 1998). Lors de ces tâches, les participants doivent répondre à un stimulus aussi rapidement et précisément que possible. Ces deux tâches font appel aux fonctions exécutives. Plus précisément, la tâche non congruente de Stroop nécessite de l'inhibition alors que la tâche AX-CPT sollicite plutôt la mémoire de travail.

La tâche de Stroop (Stroop, 1992) est régulièrement utilisée en contexte de recherche. On utilise principalement deux conditions, la condition congruente et la condition incongruente. Lors d'une condition congruente, le mot et la couleur de l'encre correspondent (voir première ligne de la

Figure 4). Dans une condition incongruente, le mot et la couleur de l'encre ne correspondent pas (voir seconde ligne de la Figure 4). Ce type de condition demande donc au participant d'inhiber la lecture du mot.

Dans la version informatisée de la tâche, quatre mots (jaune, bleu, vert et rouge) sont présentés en série sur un écran. Le participant doit appuyer sur l'une des quatre touches de couleur d'un clavier (jaune, bleu, vert ou rouge), la bonne réponse étant la touche correspondant à la couleur de l'encre du mot présenté à l'écran. Par exemple, si le mot rouge apparaît à l'encre verte, il faut appuyer sur le bouton vert.

Pour augmenter la difficulté de la tâche et éviter les effets d'apprentissage, il est possible d'ajouter une deuxième consigne. Cette deuxième consigne identifiera à quel moment la réponse attendue est le mot lui-même plutôt que la couleur de l'encre. Il arrive souvent que cette consigne soit que lorsque la couleur de l'encre est rouge, la bonne réponse est le mot lui-même et non la couleur de l'encre. Par exemple, si le mot bleu apparaît en rouge, il faut appuyer sur le bouton bleu. Dans notre procédure expérimentale, c'est lorsque le mot était encadré que la bonne réponse était le nom de la couleur et non son encre.

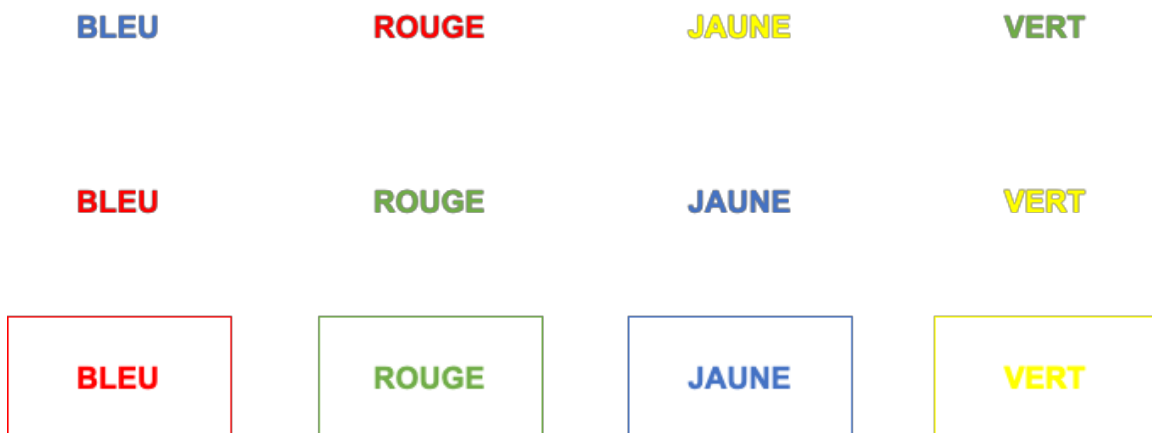


Figure 4. Illustration d'une tâche de Stroop.

La première ligne montre des essais congruents (le mot et la couleur de l'encre correspondent). La seconde ligne montre des essais incongruents (le mot et la couleur de l'encre ne correspondent pas). La

bonne réponse correspond à la couleur de l'encre (p. ex, la bonne réponse est rouge pour le mot bleu). La troisième ligne montre un essai incongruent avec une double-tâche dans laquelle la bonne réponse est la dénomination du mot (p. ex, bleu plutôt que la couleur de l'encre rouge)

Lors d'une tâche AX-CPT (voir Figure 5), une série de 4 lettres est présentée sur un écran. Le participant doit porter une attention particulière à la première et à la dernière lettre présentée. Si cette combinaison commence par un A et finie par un X, il s'agit d'une combinaison correcte. Les deuxièmes et troisièmes lettres de la série agissent comme distracteur. Le participant doit simplement identifier si une série est correcte (AX) ou non (toute autre combinaison).

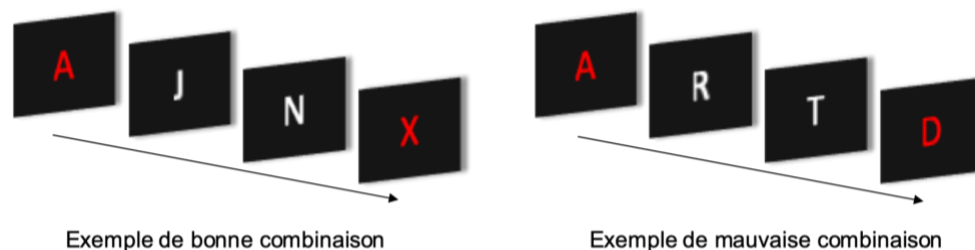


Figure 5. Illustration d'une tâche AX-CPT.

Le participant doit identifier une séquence correcte (commençant par la lettre A et se terminant par la lettre X). Toute autre séquence étant incorrecte. Tiré de Pageaux et al. (Soumis, en révision)

2.2 Induire la fatigue par un effort physique

La fatigue physique peut être induite de nombreuses façons. Elle se produit lorsqu'un individu entreprend, pour une période prolongée, une tâche physique suffisamment intense.

Gandevia (2001) indiquait dans ses recherches qu'elle peut être due à n'importe quel exercice résultant en une diminution à générer de la force ou de la puissance. Elle dépend donc du type de contractions, du ou des groupes musculaires impliqués, de la durée et de l'intensité de l'exercice. De nombreux protocoles ont été utilisés jusqu'à maintenant, par exemple un exercice de drop-jump (e.g., Marcora et al., 2008), un exercice maximal (e.g., Thomson et al., 2009) ou

sous-maximal jusqu'à épuisement (e.g., Amann et Dempsey, 2008), un exercice d'une durée prolongée (plus de 2 heures) en course, cyclisme ou ski de fond (e.g., Lepers et al., 2001). Le protocole choisi doit permettre de répondre le mieux possible à la question de recherche et il peut être nécessaire d'en combiner plusieurs (Cairns et al., 2005). Afin d'attester de la présence et de quantifier la fatigue musculaire, des contractions maximales volontaires doivent être effectuées. Cette mesure doit être prise avant la condition fatigante en guise de référence et sera comparée à une contraction maximale volontaire faite après l'exercice fatiguant. Une réduction de la puissance ou force enregistrée lors de la contraction maximale volontaire post-fatigue atteste de la présence de fatigue physique.

2.3 Mesurer la fatigue induite par un effort physique et/ou mental

Il existe de nombreuses manières de mesurer la fatigue. Elle peut être quantifiée à l'aide de différents outils, autant psychologiques (Mesures subjectives) que physiologiques (Mesures objectives).

2.3.1 Mesures subjectives

Caractérisée par un sentiment de fatigue, de manque d'énergie ou d'humeur (Boksem et Tops, 2008), la fatigue peut être mesurée dans un premier temps par des variables psychologiques reflétant les sensations ressenties par l'individu. Certaines des mesures subjectives suivantes permettent donc de témoigner de la présence de fatigue. Ces mesures peuvent être faites avant et après la tâche fatigante, une augmentation de celles-ci reflétant la présence de fatigue.

Tout d'abord, la **perception de l'effort** reflète la quantité de ressources mobilisées pour réussir un exercice physique ou cognitif. En la mesurant, il est possible d'évaluer l'engagement du sujet dans une tâche (de Morree et Marcora, 2015). En présence de fatigue, la réalisation d'une tâche

est perçue comme plus exigeante, plus couteuse. Par ailleurs, **l'échelle visuelle analogique** peut être utilisée pour mesurer les sensations subjectives de fatigue (Le Mansec et al., 2018). Elle permet de refléter directement le sentiment de fatigue du participant. De leur côté, la **Feeling scale** et la **Felt Arousal Scale** sont également des mesures qui peuvent s'avérer utiles (Astorino et al., 2012). Leur mesure représente respectivement la valence affective (plaisir/déplaisir) et l'activation perçue (forte/faible). Il en résulte quatre interprétations possibles (1) plaisir à faible activation (par exemple, calme, relaxation) ; (2) plaisir à forte activation (par exemple, énergie, excitation) ; (3) déplaisir à faible activation (par exemple, fatigue, ennui) et (4) déplaisir à forte activation (par exemple, tension, détresse) (Ekkekakis et al., 2011). Un exercice ayant une intensité sous le seuil ventilatoire, sous le seuil de lactatémie ou sous le début de l'accumulation de lactate dans le sang n'a pas d'effet sur l'affect de l'individu (Ekkekakis et al., 2011). En revanche, lorsque l'intensité est au-dessus de ces seuils physiologiques, une baisse de la positivité de l'affect peut être notée (Ekkekakis et al., 2011). Finalement, la **motivation** et **l'humeur** sont deux variables ayant un impact sur l'effort qu'un individu investit dans la tâche (Richter et al., 2016). Comme la fatigue peut se caractériser par un sentiment de manque d'énergie ou d'humeur, il est important de prendre en compte ces variables.

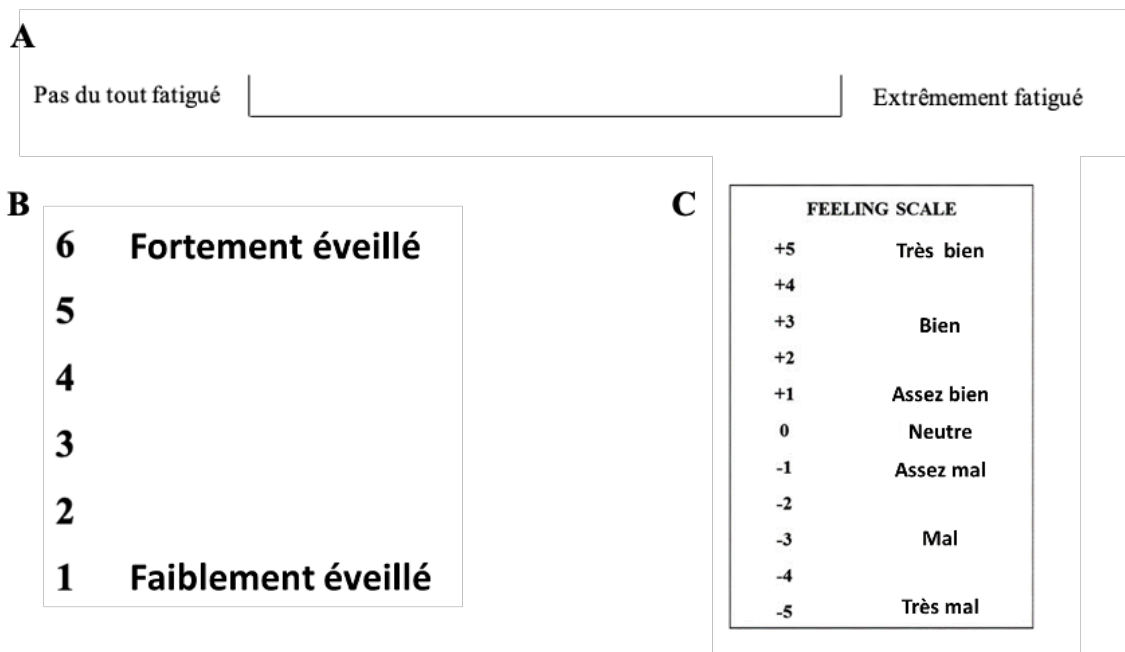


Figure 6. Différentes mesures subjectives.

Panel A : L'échelle visuelle analogique permettant de mesurer le sentiment de fatigue.

Panel B : La *Felt Arousal Scale* permettant de mesurer le niveau d'éveil / d'activation perçue

Panel C : La *Feeling Scale* permettant de mesurer la valence affective.

2.3.2 Mesures objectives

Également caractérisée par une diminution des performances subséquentes, la fatigue peut aussi être mesurée par des variables objectives. D'autres mesures telles que des changements au niveau de variables physiologiques (fréquence cardiaque, fréquence respiratoire, signal électromyographique) peuvent témoigner de l'induction de fatigue. Ces mesures peuvent être faites avant et après la tâche fatigante, tout changement — une diminution ou augmentation de la variable en fonction de cette dite-variable — pouvant attester de la présence de fatigue.

La performance à une tâche mentale peut être mesurée par une diminution du nombre de bonnes réponses, une augmentation des temps de réaction ou des inattentions. Celles-ci peuvent témoigner de la présence de fatigue. Le temps de réaction réfère au temps s'écoulant entre l'apparition du stimulus et la réponse du participant alors que les inattentions réfèrent aux stimuli apparaissant et laissés sans réponse par le participant. La **contraction maximale volontaire** est une technique permettant de mesurer la capacité d'un muscle à générer de la force. Une réduction de la force maximale, du couple ou de la puissance obtenus lors de contractions maximales volontaires est la mesure de référence pour identifier la présence d'une capacité réduite de production de force (Gandevia, 2001) et permet donc de quantifier la présence de fatigue musculaire. Le **signal électromyographique (EMG)** permet, quant à lui, d'analyser l'activité électrique du muscle au moyen d'électrodes de surface. En présence de fatigue physique, l'activité musculaire diminue et c'est par le signal EMG que cette diminution peut être reflétée (Enoka et Duchateau, 2008). Par ailleurs, toujours en présence de fatigue physique, **les fonctions cardiorespiratoires** (fréquence cardiaque et respiratoire) ont tendance à augmenter.

D'autres méthodes peuvent aussi être utilisées afin d'attester de la présence de fatigue. Il est possible de penser aux biopsies musculaires, aux prélèvements sanguins ou même à l'imagerie par résonance magnétique. La ou les méthodes choisies devront permettre de fournir les informations les plus justes dans le contexte du protocole élaboré.

3. Effets de la fatigue sur les performances

Dans cette section, nous détaillerons d'abord les effets de la fatigue induite par un effort mental et physique sur les performances cognitives puis leurs effets sur les performances physiques.

3.1. Effets de la fatigue sur les performances cognitives

3.1.1. Fatigue induite par un effort mental et performances cognitives

Les effets de la fatigue mentale sur les performances cognitives ont été largement étudiés (e.g. Boksem et al., 2005; Boksem et al., 2006; Lorist, 2008; Lorist et al., 2005; Lorist et al., 2000; van der Linden et Eling, 2006; van der Linden et al., 2003). Les performances cognitives peuvent être affectées de différentes façons. Par exemple, en présence de fatigue mentale, le nombre de bonnes réponses tend à diminuer (Marcora et al., 2009) alors que le nombre d'erreurs tend à augmenter (Lorist et al., 2000). Il est aussi possible de remarquer une augmentation du temps de réaction qui se caractérise par le temps qui s'écoule entre l'apparition du stimulus et l'enregistrement de la réponse de l'individu (Lorist et al., 2000). Par ailleurs, les inattentions tendent également à augmenter avec le temps (Boksem et al., 2005). Ces dernières sont caractérisées par les stimuli restés sans réponse de la part de l'individu.

Bien qu'un individu mentalement fatigué soit capable de bien performer lors de tâches simples (i.e. automatisées) (Holding, 1983 dans Lorist et al., 2000), comme compter ou répéter une série de chiffres (van der Linden et Eling, 2006; van der Linden et al., 2003), ses performances se détériorent lors de tâches plus complexes. Cela s'expliquerait par les processus cognitifs — les systèmes de traitement de l'information — utilisés lors de la réalisation de la tâche. Les fonctions exécutives, qui sont des processus cognitifs de haut niveau et qui requièrent un traitement descendant (dit *top-down*) de l'information, seraient compromises en présence de fatigue. Ces fonctions prennent en charge les comportements orientés vers un but et nous permettent de répondre de manière adaptative à l'environnement : sortir des habitudes, prendre des décisions et évaluer les risques, planifier l'avenir, prioriser et séquencer les actions, et faire face aux situations nouvelles (Coulacoglou et Saklofske, 2017). L'utilisation de ces fonctions demande à l'individu de mobiliser volontairement des ressources attentionnelles. Celles-ci, en présence de fatigue, se mobilisent moins facilement impactant ainsi les performances subséquentes requérant les fonctions de haut niveau. Il existe trois fonctions exécutives principales, (1) l'inhibition, (2) la mémoire de travail et (3) la flexibilité cognitive (Diamond, 2013). De ces trois fonctions exécutives en découlent plusieurs autres, telles que la planification, l'attention, etc.

Plusieurs chercheurs ont examiné la relation entre la fatigue mentale et les performances cognitives, plus particulièrement son impact sur les fonctions exécutives principales.

Par exemple, Lorist et al. (2000) ont vérifié l'effet de la fatigue mentale sur la planification et le changement de tâche. Grâce aux données électroencéphalographiques recueillies, ils ont observé qu'avec l'augmentation du temps passé sur la tâche, l'implication des lobes frontaux (qui sont associés au contrôle exécutif) était réduite. Cela leur a donc permis de confirmer l'effet négatif de la fatigue mentale sur la planification. Toutefois, les données n'ont pas permis de conclure à l'effet de la fatigue sur le changement de tâche. D'autres études se sont attardées aux effets entre la fatigue mentale et l'attention. Boksem et al. (2005) ont étudié l'effet du potentiel évoqué (ERP, potentiel électrique produit par le système nerveux en réponse à une activité cognitive) sur la fatigue mentale via une tâche d'attention continue. Les participants avaient pour objectif de

détecter une cible lorsqu'elle apparaissait sur la diagonale précédemment identifiée. Les résultats montrent, entre autres, une diminution de la performance ainsi qu'une augmentation de l'aversion, des temps de réaction et du nombre de cibles manquées avec le temps sur la tâche. Les données ERP montrent une atteinte sur le mécanisme d'attention sélective. Cet effet délétère sur l'attention semble être causé par une incapacité à allouer l'attention de manière efficace. Une distinction importante est cependant faite par les chercheurs. L'attention dirigée vers un but est affectée par la fatigue mentale, tandis que l'attention dirigée vers un stimulus ne l'est pas. Dans une autre étude, van der Linden et Eling (2006) ont observé les effets de la fatigue mentale sur le traitement local par rapport au traitement global dans une tâche d'attention locale-globale. Ils ont remarqué qu'en présence de fatigue mentale, le traitement global est moins impacté par la fatigue que le traitement local. Cela s'expliquerait par le fait que le traitement local repose davantage sur un traitement descendant de l'information.

Un effet délétère de la fatigue mentale a également été trouvé sur le contrôle des actions (Boksem et al., 2006). Elle nuit également lors de tâches requérant un ajustement de la performance à la suite d'erreurs (Lorist et al., 2005) et provoquerait une diminution de la flexibilité et une planification sous-optimale (van der Linden et al., 2003).

3.1.2. Fatigue induite par un effort physique et performances cognitives

De nombreuses études se sont intéressées aux effets de la fatigue physique sur les performances cognitives (e.g. Lambourne et Tomporowski, 2010; Moore et al., 2012; Tomporowski, 2003; Tomporowski et Ellis, 1986). Les chercheurs ont évalué les performances cognitives pendant un exercice physique, immédiatement après un épisode aigu d'exercice ou après un délai suivant l'exercice physique. Les résultats des différentes recherches sont contrastés. Plusieurs chercheurs ont tenté, au moyen de revues et/ou de méta-analyses d'éclaircir les données sur ce sujet (Brisswalter et al., 2002; Cantelon et Giles, 2021; Chang et al., 2012; Davranche et al., 2015; Etnier

et al., 1997; Lambourne et Tomporowski, 2010; McMorris et al., 2011; Pontifex et al., 2019; Tomporowski, 2003; Tomporowski et Ellis, 1986). La communauté scientifique s'entend pour dire que certains facteurs modérateurs doivent être bien contrôlés afin de statuer sur les effets de l'exercice sur les performances cognitives, ceux-ci étant (1) la nature de la tâche ; (2) l'intensité et la durée de la tâche ; (3) le moment auquel la tâche est administrée et (4) la condition physique du sujet (Brisswalter et al., 2002; Grego et al., 2004; Tomporowski et Ellis, 1986).

Dans leur méta-analyse (n = 40 études), Lambourne et Tomporowski (2010) se sont intéressés aux effets d'un exercice aigu sur la performance cognitive chez de jeunes adultes en bonne santé. Lorsque la tâche cognitive est faite pendant l'exercice physique, ils observent un effet délétère. Cependant, cet effet est observé uniquement dans les 20 premières minutes de l'exercice physique. Par ailleurs, lorsque la tâche cognitive est effectuée après l'exercice, les résultats indiquent un effet positif sur la performance cognitive. Cette méta-analyse note également une différence entre les modes d'exercices physiques. Plus précisément, une tâche sur ergocycle aurait des effets bénéfiques sur la performance cognitive que la tâche soit réalisée pendant ou après l'exercice alors qu'une tâche sur tapis roulant aurait un effet négatif sur la performance pendant l'exercice, mais un effet positif à la suite de celui-ci.

Dans une seconde méta-analyse (n = 79 études), Chang et al. (2012) analysent les effets de certains modérateurs pendant, tout de suite après un exercice et après un délai. Pour le modérateur « *intensité de l'exercice* », aucun effet n'est rapporté lorsque la tâche cognitive est administrée pendant la séance d'exercice. Tout de suite après un exercice, un effet positif est remarqué lorsque l'intensité de l'exercice physique est située entre très légère et modérée. Lorsque la tâche cognitive est administrée après un délai (plus d'une minute suivant l'exercice), un effet négatif est observé sur la performance cognitive lors d'un exercice physique très léger. Toutefois, pour tous les autres niveaux d'intensité, un effet positif est observé. Du côté du modérateur « *type de tâche cognitive* », une tâche cognitive misant sur les fonctions exécutives montre un effet positif, peu importe le moment auquel la tâche est administrée. Il ne semble pas

y avoir d'effet pour les tâches non exécutives (ex. : traitement de l'information, temps de réaction, mémoire). Finalement, pour le modérateur « *niveau de forme physique* », les participants en excellente forme physique en retirent des bénéfices que la tâche cognitive soit faite pendant ou tout de suite après l'exercice physique. Pour les participants en faible forme physique, un effet négatif est noté lorsque la tâche est faite pendant l'exercice, mais un effet positif est noté lorsqu'elle est effectuée tout de suite après. Pour les participants en forme modérée, les effets semblent négligeables. Ce modérateur n'a pas d'effet sur les performances cognitives après un délai. En somme, cette méta-analyse montre un (petit) effet positif de l'exercice physique sur les performances cognitives. Cependant, la littérature ne dissociant pas l'exercice fatigant de l'exercice non-fatigant, cela reste à explorer.

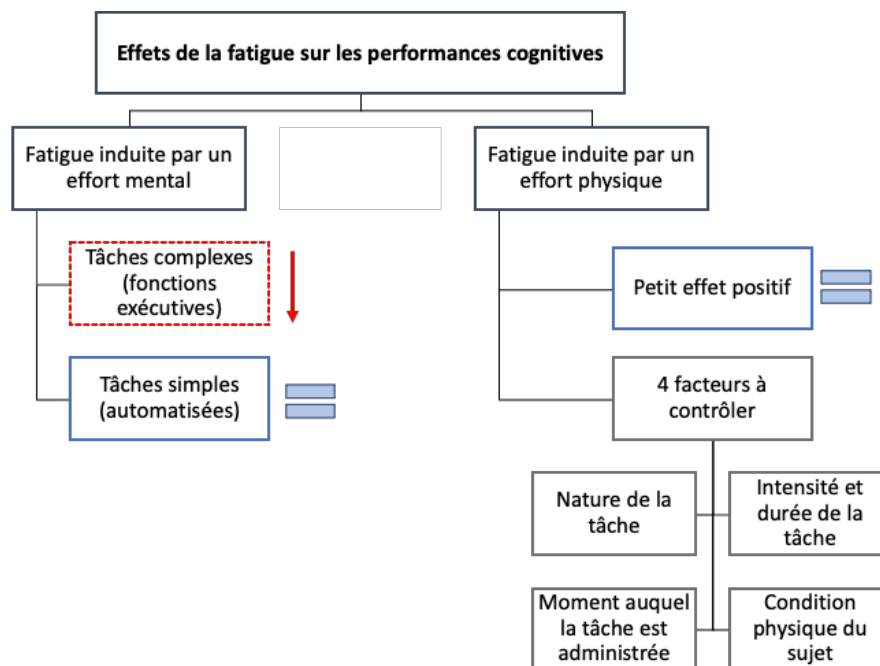


Figure 7. Synthèse des effets de la fatigue sur les performances cognitives.

En rouge, les performances altérées en présence de fatigue. En bleu, les performances maintenues.

3.2 Effets de la fatigue sur les performances physiques

Les performances physiques peuvent être divisées en trois catégories : (1) les performances d'endurance, (2) les performances de force, puissance et vitesse maximale ainsi que (3) les performances psychomotrices. Les effets de la fatigue induite par un effort mental ou physique sur chaque type de performance seront décrits dans les sections suivantes.

3.2.1 Fatigue induite par un effort mental et performances physiques

Pageaux et Lepers (2016) indiquent qu'un exercice cognitif d'au moins 30 minutes est nécessaire pour induire de la fatigue mentale. Par ailleurs, Brown et al. (2020) ont montré au moyen d'une méta-analyse que la fatigue induite par un effort mental aurait des effets négatifs sur une performance physique ultérieure, peu importe la durée de l'exercice mental.

3.2.1.1 Performances d'endurance

La performance d'endurance est la capacité à produire une force, une puissance ou une vitesse donnée aussi longtemps que possible. Il s'agit d'un exercice sous-maximal d'une durée d'au moins 75 secondes et sollicitant principalement le système énergétique aérobie (Pageaux et al., Soumis, en révision).

Mosso (1906) est le premier à avoir rapporté un effet négatif de la fatigue mentale sur une performance d'endurance musculaire alors qu'il observait deux de ses collègues professeurs donner des cours magistraux et des examens oraux. En 2009, (Marcora et al.) mène une étude confirmant l'impact négatif de la fatigue mentale sur une performance d'endurance. Dans celle-ci, 16 participants devaient pédaler jusqu'à épuisement à 80 % de leur puissance maximale après une tâche mentale de 90 minutes (condition fatigante) ou après avoir regardé un documentaire

émotionnellement neutre (condition contrôle). Leurs résultats montrent une diminution de la performance physique chez les individus mentalement fatigués, mais une absence de changements cardiovasculaire, respiratoire ou métabolique en réponse à l'exercice. Par ailleurs, ils notent que seule la perception de l'effort augmente chez les individus mentalement fatigués entre les essais.

Depuis 2009, plusieurs chercheurs se sont intéressés et ont confirmé la détérioration des performances d'endurance en présence de fatigue mentale. Pageaux et al. (2013), via un exercice isométrique sous-maximal des extenseurs du genou confirment l'impact de la fatigue mentale sur une performance d'endurance lors d'un exercice jusqu'à épuisement (i.e. *time to exhaustion*). Les exercices à rythme libre (i.e. *self-paced*) sont également affectés en présence de fatigue mentale. Effectivement, ce sont les résultats de Smith et al. (2015) et de Brownsberger et al. (2013) qui ont respectivement trouvé ces conclusions lors d'un exercice de course intermittente à haute intensité ou lors de deux exercices d'une durée de 10 minutes à vélo. Il en va de même pour des performances contre-la-montre (i.e. *time trial*) de 5 km sur tapis roulant (Pageaux et al., 2014) ou de 3 km sur piste de course (MacMahon et al., 2014).

Les recherches arrivent à une conclusion commune : en présence de fatigue mentale, la diminution des performances en endurance serait attribuée à l'augmentation de la perception de l'effort (Marcora et al., 2009; Pageaux et Lepers, 2016).

3.2.1.2 Production de force, puissance et vitesse maximale

La production de force maximale est la capacité à produire une force, une puissance ou une vitesse maximale pendant une courte durée. Il s'agit d'un exercice maximal sollicitant le système énergétique anaérobie (Pageaux et al., Soumis, en révision).

Bien que la fatigue mentale ait un effet délétère sur une tâche d'endurance subséquente, celle-ci n'altère pas la force maximale volontaire (Pageaux et al., 2013). Effectivement, il a été démontré que la fatigue induite par un effort mental n'altérerait pas les capacités de production de force lors de contractions maximales isométriques des extenseurs du genou (Pageaux et al., 2013) et des fléchisseurs du coude (Le Mansec et al., 2018). Par ailleurs, les tâches de production de puissance ne sont pas affectées en présence de fatigue mentale. C'est ce que constatent Martin et al. (2015) dans une étude où les participants fatigués mentalement ne voient pas leurs performances diminuées lors de sauts en contre-mouvement ou lors d'un test d'effort maximal de 3 minutes. Duncan et al. (2015) confirment également ces résultats lors d'exercices anaérobiques répétés de haute intensité chez des adultes entraînés. Finalement, la fatigue induite par un effort mental ne semble pas non plus avoir d'impact sur les tâches de production de vitesse. Ces résultats ont été trouvés lors d'un test sur tapis roulant alors que la capacité à sprinter était identique autant en présence de fatigue que dans la condition contrôle (Smith et al., 2015). Brown et al. (2020) confirment dans leur revue systématique avec méta-analyse, aucun effet délétère de la fatigue mentale sur les performances anaérobies maximales.

3.2.1.3 Performances psychomotrices

La performance psychomotrice est la capacité à exécuter avec précision des mouvements dirigés vers un but (p. ex, frapper un volant au badminton) (Pageaux et al., Soumis, en révision). Des études ont également démontré la dégradation de ce type de performance dans un contexte de fatigue mentale.

Rozand et al. (2015) s'intéressent aux tâches de motricité fine combinant vitesse et précision. Dans cette étude, dix participants devaient réaliser une tâche de pointage réelle ou imaginée après une tâche mentale de 90 minutes (condition fatigante) ou après avoir regardé un

documentaire émotionnellement neutre (condition contrôle). Leurs résultats montrent une diminution de la vitesse d'exécution chez les individus mentalement fatigués lors de la tâche réelle et lors de la tâche imaginée. Duncan et al. (2015) s'intéressent, quant à eux, aux effets sur une tâche de dextérité manuelle et sur une tâche de temps d'anticipation. Les résultats confirment qu'en présence de fatigue induite par un effort mental, le temps pour réaliser la tâche augmente significativement.

La performance décisionnelle est la capacité à prendre des décisions dans un contexte sportif et s'inscrit dans la performance psychomotrice. Cette capacité à lire le jeu rapidement et à poser l'action appropriée est fondamentale afin d'obtenir une performance réussie. Par exemple, dans un match de soccer, un athlète évaluera quelle option de passe est la meilleure ou devra évaluer la trajectoire du ballon pour l'intercepter. Les performances cognitives étant altérées en présence de fatigue et la prise de décision relevant des fonctions exécutives, il est attendu que ce type de performance soit altérée. Toutefois, ces études réalisées en laboratoire ne se sont pas attardées à la réalité sur le terrain. Quelques études se sont donc intéressées aux effets de la fatigue sur la prise de décision en milieu sportif et ont constaté une altération des performances dans ce milieu. Smith et al. (2016) se sont intéressés à la prise de décision chez des joueurs de soccer professionnel. Lorsque le joueur recevait le ballon, il devait prendre une décision rapide et précise en effectuant l'action la plus appropriée, soit (1) passer à n'importe quel joueur, (2) tirer au but ou (3) dribbler. Les résultats de cette étude montrent une diminution de la vitesse et de la précision dans la prise de décision spécifique au soccer dans un contexte de fatigue mentale. Toutefois, la fatigue ne semble pas altérer les comportements de recherche visuels des athlètes. Ces mêmes résultats ont été confirmés dans un contexte de mini-matches de soccer (i.e., *small-sided game*) lors desquels la précision des passes, des dribbles et des tirs était moins bonne en présence de fatigue (Trecroci et al., 2020). Une autre étude a montré que la fatigue détériore la précision du jugement chez les soldats fatigués, ceux-ci commentant davantage d'erreurs de commission (Head et al., 2017).

3.2.2 Fatigue induite par un effort physique et performances physiques

3.2.2.1 Performance d'endurance

Caractérisée par un exercice nécessitant la filière aérobie et d'une durée minimale de 75 secondes, la performance d'endurance est la capacité à produire une force, une puissance ou une vitesse donnée aussi longtemps que possible (Pageaux et al., Soumis, en révision). Elle peut être une performance jusqu'à épuisement (i.e. *time to exhaustion*), un contre-la-montre (i.e. *time trial*) ou un exercice graduel (Pageaux et Lepers, 2016).

Marcora et al. (2008) s'intéressent à l'impact de la fatigue physique sur une performance d'endurance. Dans cette étude, les participants ont été fatigués physiquement grâce à un protocole de 100 drops-jump consistant en un saut toutes les 20 secondes pour une durée totale de 33 minutes. Après un repos de 30 minutes, ils réalisent une tâche de cyclisme à 80 % de leur puissance maximale jusqu'à épuisement. Les résultats suggèrent un effet de la fatigue physique sur les réponses cardiorespiratoires via une augmentation du rythme cardiaque et de la fréquence respiratoire. Par ailleurs, ils observent une diminution de la performance sur la tâche de cyclisme, indépendamment de tout stress métabolique. Contrairement au groupe contrôle, le temps d'épuisement était plus rapide chez les participants fatigués.

Dans une autre étude (Amann et Dempsey, 2008), les participants ont subi une double condition fatigante. Ils ont d'abord pédalé jusqu'à épuisement à 83 % de leur puissance maximale puis pour le même nombre de minutes à 67 % de leur puissance maximale. Après chaque exercice fatigant, les participants devaient compléter un exercice de pédalage de 5 km contre-la-montre. Les résultats montrent une augmentation du temps pour compléter la tâche d'endurance dans les deux cas.

Dans leur mini-revue, Pageaux et Lepers (2016) recensent et analysent les études s'intéressant aux effets de la fatigue physique (et mentale) sur des performances subséquentes en endurance. Les chercheurs observent un effet négatif de la fatigue physique sur une performance d'endurance. Cet impact négatif concerne autant les groupes musculaires impliqués dans la tâche que ceux non impliqués et s'observe dans tous types d'exercices, qu'ils soient globaux (i.e. vélo) ou isolés (i.e. extensions du genou).

3.2.2.2 Production de force, puissance et vitesse maximale

Sollicitant le système énergétique anaérobie, ce type de performance est la capacité à produire une force, une puissance ou une vitesse maximale pendant une courte durée (Pageaux et al., Soumis, en révision).

La définition même de la fatigue physique implique une diminution transitoire de la capacité à effectuer des actions physiques (Enoka et Duchateau, 2008; Gandevia, 2001) et se caractérise par une diminution de la production de force ou de puissance maximale des muscles mis en jeu dans l'exercice (Gandevia, 2001). En d'autres termes, lorsqu'il y a une diminution des performances de production de force, vitesse ou puissance, il est possible de confirmer la présence de fatigue physique. Cette diminution est estimée grâce à la comparaison d'une contraction volontaire maximale effectuée avant l'exercice induisant la fatigue et après celui-ci. Il est donc normal et attendu qu'en présence de fatigue induite par un effort physique, ce type de performance soit altéré.

3.2.2.3 Performances psychomotrices

De son côté, la performance psychomotrice est la capacité à exécuter avec précision des mouvements dirigés vers un but (p. ex, frapper un volant au badminton) (Pageaux et al., Soumis, en révision).

La fatigue induite par un effort physique a également un effet délétère sur les performances motrices fines. Une étude menée par Missenard et al. (2009) confirme son effet lors d'une tâche de pointage. Dans cette étude, les participants ont été physiquement fatigués au moyen de contractions isométriques réalisées jusqu'à épuisement. Les contractions consistaient en des flexions et des extensions du coude d'une puissance fixée à 60 % de leur contraction maximale volontaire. Entre chaque contraction, un repos de 15 secondes était donné. Leurs résultats montrent une augmentation du temps de mouvement en présence de fatigue ainsi qu'une diminution de l'accélération, de la décélération et de la vitesse maximale.

Un effet de la fatigue physique existe également sur la performance décisionnelle qui est la capacité à prendre des décisions liées au sport. Par exemple, dans un match de hockey, un joueur évaluera quelle option de passe est la meilleure ou devra évaluer la trajectoire de la rondelle pour l'intercepter. Thomson et al. (2009) ont évalué si les athlètes, après la réalisation d'un test incrémental sur tapis roulant, prenaient des décisions plus rapidement au détriment de la précision ou privilégiaient la précision au détriment de la vitesse. Les résultats montrent que le temps de prise de décision des athlètes diminuait et que les erreurs de prise de décision augmentaient après un exercice aérobie maximal. Pour compenser la fatigue, les athlètes semblent donc prendre des décisions plus rapidement au détriment de la précision.

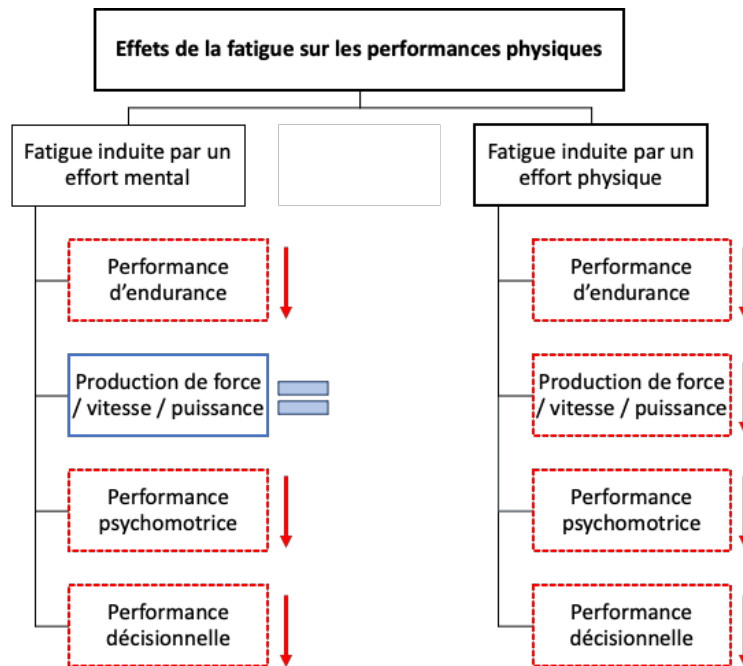


Figure 8. Synthèse des effets de la fatigue sur les performances physiques.

En rouge, les performances altérées en présence de fatigue. En bleu, les performances maintenues.

3.3 Conclusion

Les performances cognitives, et plus particulièrement les performances liées aux fonctions exécutives, sont affectées par la fatigue mentale alors qu'un petit effet positif de l'exercice physique est constaté sur celles-ci. De leur côté, les performances physiques sont affectées autant par la fatigue physique que par la fatigue mentale. Toutefois, des différences dans l'atteinte des performances sont à noter. Seule la fatigue physique entraîne une diminution des capacités de force, de vitesse et de puissance maximale et une atteinte aux réponses cardiorespiratoires. La seule variable commune à la fatigue mentale et physique est la perception d'effort (Pageaux et Lepers, 2016).

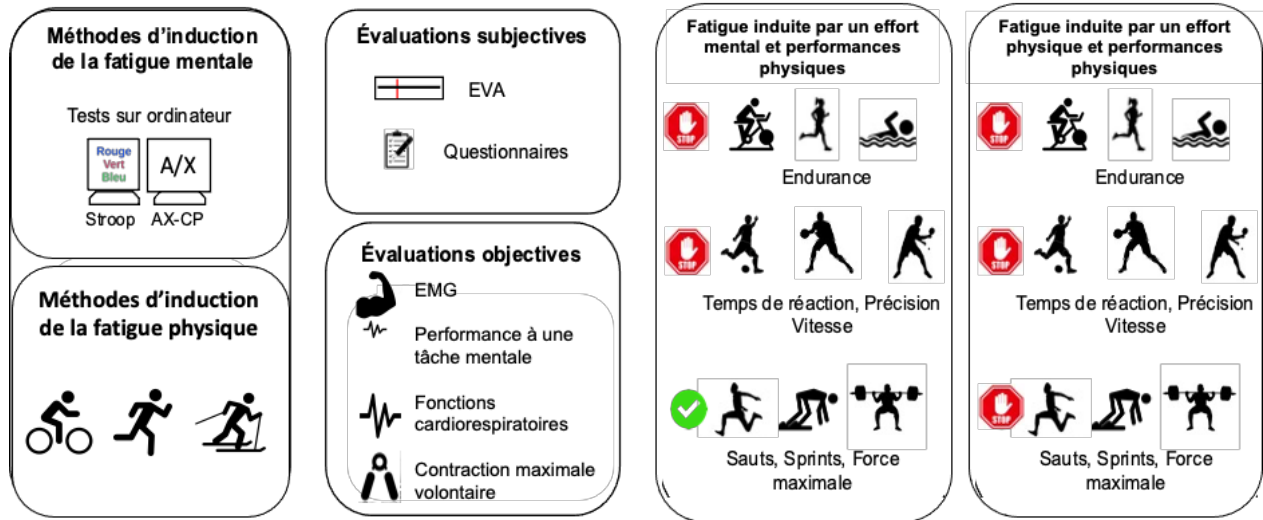


Figure 9. Synthèse des méthodes d'induction, des outils d'évaluation et des effets sur les performances physiques.

AX-CP = performance continue de l'AX, « AX continuous performance » ; EMG = signal électromyographique
 EVA = échelle visuelle analogique. Figure extraite de Pageaux et al. (Soumis, en révision) et modifiée.

4. Fatigue et perception de l'effort

À ce jour, la perception de l'effort est la seule variable altérée en présence de fatigue induite par un effort physique ou mental, et ce peu importe le type de performance (Pageaux et Lepers, 2016). En présence de fatigue, la réalisation d'une tâche est perçue comme plus exigeante, plus couteuse. Ainsi, lorsqu'un individu fatigué doit maintenir une performance, il pourra surmonter son sentiment de fatigue, mais sa perception d'effort augmentera avec le temps (Pageaux et Lepers, 2016). L'effet négatif de la fatigue sur les performances serait dû à son interaction avec la perception de l'effort. En lien avec l'importance de cette variable, nous allons la définir et expliquer les modèles neurophysiologiques existants.

4.1 Définition et mesure de la perception de l'effort

La perception de l'effort est définie comme la sensation consciente de la difficulté et de l'intensité d'une tâche (Marcora, 2009) et correspond à l'intensité de l'engagement dans une tâche. Elle est ressentie par un individu dès qu'il s'engage dans une tâche, il n'est donc pas possible de percevoir un effort lorsque l'on est passif (Pageaux et Lepers, 2016). Exacerbée en présence de fatigue, la perception de l'effort est impliquée dans la régulation du comportement humain (Inzlicht et al., 2018; Pageaux et Lepers, 2016). Par sa définition, la perception est une mesure subjective. Il importe de souligner que la perception de l'effort diffère des autres sensations liées à l'exercice comme la douleur ou l'inconfort (Pageaux, 2016).

La perception de l'effort peut être évaluée grâce à l'une des échelles psychophysiques développées par Borg (voir Figure 10) : l'échelle de Borg RPE (aussi appelée échelle 6-20), l'échelle de Borg CR10 ou l'échelle de Borg CR100 (aussi appelée échelle centiMax). Deux variables composent cette échelle, une composante physique représentant l'intensité de l'exercice effectué et une composante psychologique représentant les sensations d'efforts ressenties pendant l'exercice. L'échelle psychophysique représente donc la relation entre ces deux variables.

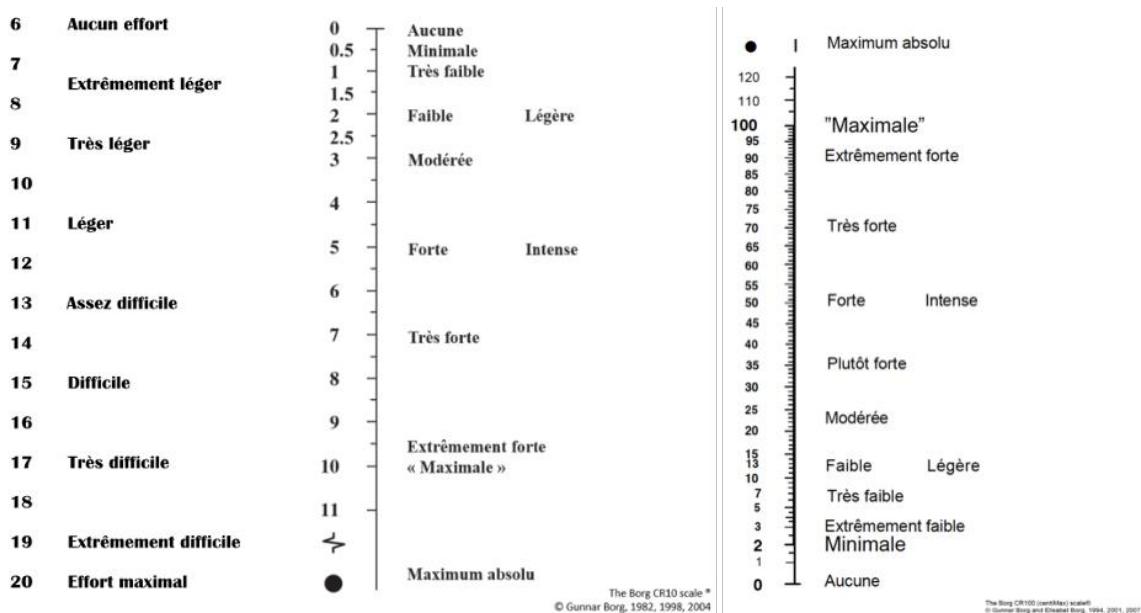


Figure 10. Échelles de perception de l'effort, extraite de Borg et Kaijser (2006)

À gauche, l'échelle de Borg 6-20 ; au milieu, l'échelle de Borg CR10 ; à droite, l'échelle de Borg centiMax.

4.2 Neurophysiologie de l'effort

Bien que les scientifiques s'entendent pour dire que la perception de l'effort provient de l'intégration centrale de signaux sensoriels (Robertson et Noble, 1997), les physiologistes n'ont pas réussi à établir de consensus en ce qui concerne la provenance du signal sensoriel menant à la perception de l'effort (Smirmaul Bde, 2012). Il existe deux modèles populaires pour expliquer ce phénomène (voir Figure 11).

Le premier est celui du modèle des afférences musculaires. Ce modèle suggère que la perception de l'effort est générée par le système nerveux central à la suite de la rétroaction provenant des muscles actifs pendant l'exercice physique tels que les muscles squelettiques, le cœur ou les poumons (Noble et Robertson, 1996; St Clair Gibson et al., 2006). Les physiologistes qui prônent ce modèle suggèrent d'ailleurs que ce sont les afférences III-IV qui jouent un rôle dans la génération de la perception de l'effort (St Clair Gibson et al., 2006).

Le second est celui du modèle de la décharge corollaire. Ce modèle suggère plutôt que la perception de l'effort est générée grâce à une copie de la commande motrice centrale (la décharge corollaire), qui est envoyée aux muscles actifs (de Morree et al., 2012; Enoka et Stuart, 1992). Bien que ce modèle n'exclue pas les contributions périphériques dans la régulation de l'effort, il stipule que les afférences ne génèrent pas la perception de l'effort (Pageaux, 2016; Smirmaul Bde, 2012).

Bien qu'un débat continue de persister quant à la neurophysiologie de l'effort, une étude récente s'intéressant à la fatigue induite par un effort mental lors d'une tâche d'imagerie prolongée a

montré que l'augmentation de la perception de l'effort serait liée à une augmentation de l'activité des aires motrices et prémotrices (i.e., la commande motrice centrale) (Jacquet et al., 2021).

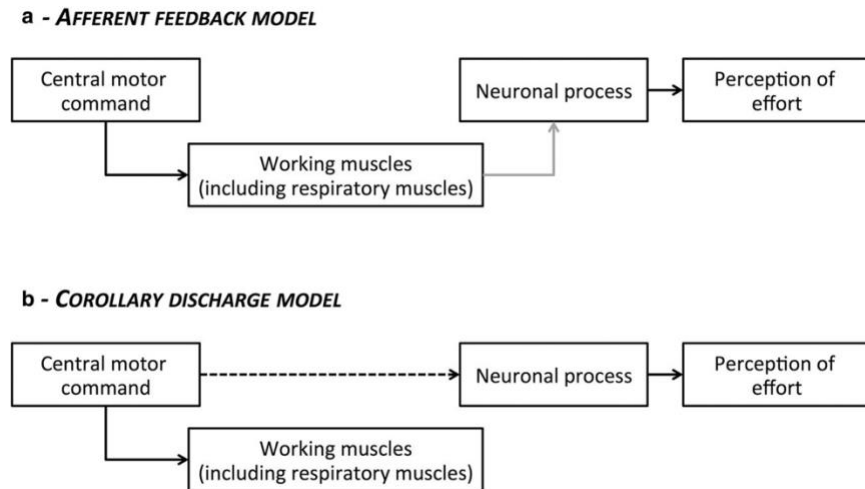


Figure 11. Modèle des afférences musculaires et modèle de la décharge corollaire

Tiré de Pageaux (2016)

Panel A : le modèle des afférences musculaires stipulant que le signal sensoriel provient des muscles actifs et que la PE est générée par le système nerveux central.

Panel B : le modèle de la décharge corollaire suggérant que le signal sensoriel provient d'une copie de la commande motrice centrale (la décharge corollaire).

5. Objectif de ce mémoire

La majorité des recherches sur la fatigue examine ce phénomène en silo, c'est-à-dire en s'intéressant à un seul type de fatigue, par exemple la fatigue induite par un effort mental et ses effets sur les performances cognitives (e.g. Boksem et al., 2005; Boksem et al., 2006; Lorist, 2008; Lorist et al., 2005; Lorist et al., 2000; van der Linden et Eling, 2006; van der Linden et al., 2003) vs la fatigue induite par un effort physique et ses effets sur les performances physiques (e.g. Amann et Dempsey, 2008; Enoka et Duchateau, 2008; Marcora et al., 2008; Missenard et al., 2009;

Pageaux et al., 2017), affectant donc notre compréhension globale de celle-ci ainsi que son impact autant sur la santé que la performance ou la qualité de vie. Plus récemment, des études « croisées » se sont intéressées à l'impact de la fatigue mentale sur une tâche physique (e.g. Brown et Bray, 2017; Marcora et al., 2009; Pageaux et al., 2014; Pageaux et al., 2013) et à l'impact de la fatigue physique sur une tâche mentale (e.g. Cantelon et Giles, 2021; Davranche et McMorris, 2009; Lambourne et Tomporowski, 2010; Pontifex et al., 2019). Les recherches mettant rarement en relation la composante subjective avec les altérations « objectives » (p. ex., altération de la performance), il est intéressant d'intégrer l'impact de la fatigue mentale et physique au sein d'un même projet, afin de mieux comprendre la fatigue chez le participant sain. Comme ces études sont réalisées dans un environnement de contrôle en laboratoire et sont basées sur un protocole standardisé qui peut manquer de validité écologique, il y a un besoin urgent d'études explorant ce que les participants ressentent réellement.

Dans ce contexte, en fusionnant les approches quantitatives et qualitatives (i.e., méthode mixte) et un design d'étude de cas multiples, la présente étude vise à examiner la relation entre les données objectives et subjectives.

Conséquemment, le but de ce mémoire est d'investiguer la fatigue induite par un effort physique et mental du point de vue du participant. Pour y parvenir, nous nous étions fixé deux objectifs. Notre premier objectif était de proposer un protocole innovant mettant en lien la fatigue mentale et la fatigue physique. Notre second objectif était d'explorer l'expérience de la fatigue selon la perspective du participant. La mise en relation des données objectives avec les données subjectives et perceptions des participants nous permet d'en apprendre davantage sur le concept de fatigue. À notre connaissance, il s'agit de la première étude qui s'intéresse à l'expérience des participants dans un contexte de fatigue-induite.

Chapitre 2 – Article (à soumettre)

Objective and subjective experience of fatigue-induced by physical and mental exertion: A mixed-design multiple-case pilot study

Camille Féral-Basin^{1,2}, Jeffrey Caron^{1,3}*, Benjamin Pageaux^{1,2}*

* Both authors equally contributed to this work

¹École de Kinésiologie et des Sciences de l'Activité Physique, Faculté de Médecine, Université de Montréal, Montréal, Canada

²Centre de Recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal, Montréal, Canada

³Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain, Montréal, Canada

Corresponding author:

Benjamin Pageaux, École de Kinésiologie et des Sciences de l'Activité Physique (EKSAP), Faculté de Médecine, Université de Montréal, Montréal, Canada

Tel: 514-343-6111 #55517

Email: benjamin.pageaux@umontreal.ca

Abstract

Aim: We all experience fatigue daily. It is characterized by an increased in tiredness and/or a decrease in performance. Mental fatigue (MF) can be distinguished from physical fatigue (PF). This multiple case study aims to investigate fatigue from the participant's perspective and examine the relationship between objective and subjective data.

Methods: Our study was conducted using mixed methods to explore the experience of fatigue. The quantitative part of the experiment induced MF and PF in 4 participants who completed a battery of tests before and after the fatiguing condition. The qualitative part, a semi-structured individual interview, explored the experience of fatigue, perception of effort, and performance experienced during the two experimental sessions. Participants were also asked to reflect their experience using methods such as video recordings and PhotoVoice. Descriptive quantitative statistics and a qualitative thematic analysis of the interview data were performed.

Results: Using the operational definition of fatigue, quantitative data show that MF (n=3) and PF (n=1) were induced only in some participants. However, qualitative data differed, with one participant attesting to having been fatigued by PF (n=1). Thematic analysis also revealed differences between the reported quantitative data collected in the laboratory and the reported qualitative data collected through the interview.

Conclusion: There is therefore a contradiction between the definitions of the concepts of PF and MF and the quantitative and qualitative data used to quantify it.

Key words: Mixed-methods, fatigue induced by mental exertion, fatigue induced by physical exertion, performance, perception of effort

1. Introduction

We have all experienced fatigue and continue experiencing it every day, whether it is after a day of work, study, or physical activity. Fatigue is defined by the Oxford dictionary as an “extreme tiredness resulting from mental or physical exertion or illness” and/or “a reduction in the efficiency of a muscle or organ after prolonged activity”. This definition nicely illustrates the two components of fatigue. The first one is the subjective aspect of fatigue referring to the experience of feeling exhausted, tired, lacking energy (Boksem et al., 2006; Boksem et Tops, 2008; Pageaux et Lepers, 2018). The second one refers to an objective aspect of fatigue referring either to a decreased performance or a decrease efficiency of an organ. Consequently, to understand the fatigue phenomenon it is essential to consider both its objective and subjective aspects.

As you are lifting weights in the gym or cycling, you are voluntarily engaging in a physical task and therefore producing an effort. If the effort invested is intense enough and prolonged over time, you may experience fatigue induced by physical exertion. In the kinesiology and exercise science literature, fatigue induced by physical exertion is traditionally defined as physical fatigue or muscle fatigue (Enoka et Stuart, 1992; Tanaka et Watanabe, 2012). Fatigue induced by physical exertion is operationally defined as a transient decrease in the ability to perform physical actions (Enoka et Duchateau, 2008; Gandevia, 2001) and is characterized by a decrease in maximal force or power production capacity (Gandevia, 2001). This objective manifestation of fatigue could, but not always, be associated with an increased feeling of tiredness and lack of energy (i.e., subjective manifestations). When an individual must maintain a performance (i.e., a constant motor output) in the presence of fatigue induced by physical exertion, their effort will gradually increase over time (Pageaux et Lepers, 2016). When the physical demand becomes too great and fatigue becomes too intense, she/he will have to choose between decreasing the workload or disengaging from the task performed (Brehm et Self, 1989; Marcora, 2019). Behavioural and/or physiological changes can also occur in the presence of exercise-induced fatigue. At the behavioural level, it can lead to a decrease in performance on a subsequent physical task (e.g.

Marcora et al., 2008; Missenard et al., 2009) whereas at the physiological level, fatigue can also manifest itself through various responses such as increased cardiorespiratory responses (Marcora et al., 2008).

As you are actively listening to a lecture, attending a conference, or watching a movie in your second language, you are using many mental resources and therefore also engaging effort. As in the context of physical exertion, when the mental demand is high and the engagement is prolonged, you may experience fatigue induced by mental exertion. In the kinesiology and exercise science literature, fatigue induced by mental exertion is traditionally defined as mental fatigue or cognitive fatigue (e.g. Boksem et Tops, 2008; MacMahon et al., 2014). Fatigue induced by mental exertion is a psychobiological state caused by prolonged demanding cognitive activities (Boksem et Tops, 2008). It can be characterized by an increase in feelings of tiredness or even exhaustion, an aversion to continue the ongoing task, and a decrease in cognitive performance (Boksem et al., 2006; Boksem et Tops, 2008; Pageaux et Lepers, 2018). In the presence of fatigue induced by mental exertion, individuals will likely avoid engaging in further effort and tend to reduce engagement in the task (Holding, 1983; Meijman, 2000). However, certain factors, such as increased motivation, can counteract the effects of fatigue induced by mental exertion on performance (Hopstaken et al., 2015). Objectively, fatigue induced by mental exertion can be characterized by changes at the behavioural level and/or the physiological level. Behaviourally, it can be manifested by a decrease in performance on a subsequent task whether cognitive (e.g., van der Linden et al., 2003) or physical (e.g., Marcora et al., 2009). Physiologically, fatigue induced by prolonged mental exertion can manifest as an alteration in the brain's activity (Jacquet et al., 2021; Wang et al., 2016). When an individual maintains cognitive performance at the expense of increasing feelings of fatigue, no abnormal physiological response has currently been identified (Marcora et al., 2009; Pageaux et Lepers, 2018).

Fatigue induced by prolonged physical exertion has a negative impact on physical performances (e.g., Amann et Dempsey, 2008; Enoka et Duchateau, 2008; Marcora et al., 2008; Missenard et

al., 2009; Pageaux et Lepers, 2016) and has a small positive impact on cognitive performances (e.g., Chang et al., 2012). Fatigue induced by prolonged mental exertion has a negative impact on endurance (e.g., Brownsberger et al., 2013; Marcora et al., 2009; Pageaux et al., 2014; Pageaux et al., 2013; Smith et al., 2015) and psychomotor performances (e.g., Duncan et al., 2015; Rozand et al., 2015; Trecroci et al., 2020) as well as cognitive performances (e.g., Boksem et al., 2005; Boksem et al., 2006; Lorist, 2008; Lorist et al., 2005; Lorist et al., 2000; van der Linden et Eling, 2006; van der Linden et al., 2003). Whether fatigue is induced by physical or mental exertion, the perception of effort in the task will increase. Perception of effort could be defined as the monitoring of the mental and physical resources involved in a task (Preston et Wegner, 2009). In other words, when individuals are fatigued, they perceive the cognitive or physical task as being more intense and harder, more effortful (Marcora et al., 2009; Pageaux et Lepers, 2016).

Research on fatigue has mostly examined this phenomenon by focusing on one type of fatigue, for example, fatigue induced by mental exertion and its effects on cognitive performances (e.g., Boksem et al., 2005; Boksem et al., 2006; Lorist, 2008; Lorist et al., 2005; Lorist et al., 2000; van der Linden et Eling, 2006; van der Linden et al., 2003) or fatigue induced by physical exertion and its effects on physical performances (e.g., Amann et Dempsey, 2008; Enoka et Duchateau, 2008; Marcora et al., 2008; Missenard et al., 2009; Pageaux et al., 2017). More recently, research has started to break the silo between disciplines and have looked at the impact of fatigue induced by mental or physical exertion on a subsequent physical (e.g., Brown et Bray, 2017; Marcora et al., 2009; Pageaux et al., 2014; Pageaux et al., 2013) or mental task (e.g., Cantelon et Giles, 2021; Davranche et McMorris, 2009; Lambourne et Tomporowski, 2010; Pontifex et al., 2019), respectively. However, those studies focused primarily on the objective aspect of performance and therefore, the potential decrease in performance. However, little attention has been afforded to the subjective fatigue experienced by participants.

Using an explanatory sequential mixed method approach (which combines quantitative and qualitative methods), and a multiple case study design, the purpose of this study was to explore the experience of fatigue from the participant's perspective. To the best of our knowledge, this is

the first study to use mixed methods to explore participants' objective and subjective experiences of mental and physical fatigue.

2. Methods

Participants

Two female (mean \pm SD; age: 22 ± 3 years, height: 162 ± 1 cm, weight: 61 ± 3 kg) and two male adults (mean \pm SD; age: 27 ± 1 years, height: 179 ± 0 cm, weight: 69.5 ± 2 kg) volunteered to participate in this study. Originally, we aimed to recruit twelve participants (two females and two males per category: endurance-trained, active non-endurance trained, and non-active). However due to the COVID-19 pandemic and its impact on resources and time available for the MSc student leading this research project, we were only able to recruit four participants: one non-active female, one active female, one active male and one specifically trained in endurance male (see Table 1). Consequently, this preliminary project includes four case reports.

“Active” and “non-active” were defined using the World Health Organization recommendation, which is taking part in moderate to high intensity exercise for at least 150 minutes per week (active) or less than 150 minutes per week (not active). None of the participants had any pain-related, neurological, or psychological disorders nor presence of any somatic illnesses. Each participant gave written informed consent prior to the study.

The study was approved by the local ethics committee of the Centre de recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montreal.

Table 1. *Participants' Characteristics*

Participant	Age (yrs)	Weight (kg)	Height (m)	Estimated VO₂max	Physical activity
Endurance- Trained Male	28	71	1.79	60.15	cyclist, 10-15 hours of training per week
Active Male	26	68	1.79	56.97	6.25 hours of physical activity per week, mostly cycling, running, climbing
Active Female	24	59	1.57	40.79	5 hours of physical activity per week, mostly cycling
Non-Active Female	20	63.5	1.68	37.11	up to 2 hours of light activity per week, yoga and walking

Note. Yrs: years; kg: kilogram; m: meter.

Estimated VO₂max is the average of VO₂max estimated by George et al. (1997) and Huet (1984).

Study Design

Experimental protocol. An explanatory sequential multiple case mixed methods study was designed (QUANT → QUAL). The purpose of this design is to use a qualitative approach to explain quantitative results. Participants visited the laboratory to induce fatigue on two different occasions interspaced by a week to allow full recovery. During the first visit, participants performed a prolonged mental exertion task and during the second visit, participants performed a prolonged physical exertion task (for more detail, see fatiguing tasks). The order of the two visits were randomized and in a counterbalanced order. Right before and after the fatiguing task, participants performed a series of performance tests (for more details, see pre- and post-performance tests). Participants were familiarised with all performance tests at the beginning of their first visit. An overview of the study procedure and experimental protocol is provided in Figure 12. A series of questionnaires were assessed before, during and at the end of each visit. Heart rate and breathing rate were continuously recorded throughout the experiment. For more details, see the “Psychological measurements” and “Physiological measurements” sections.

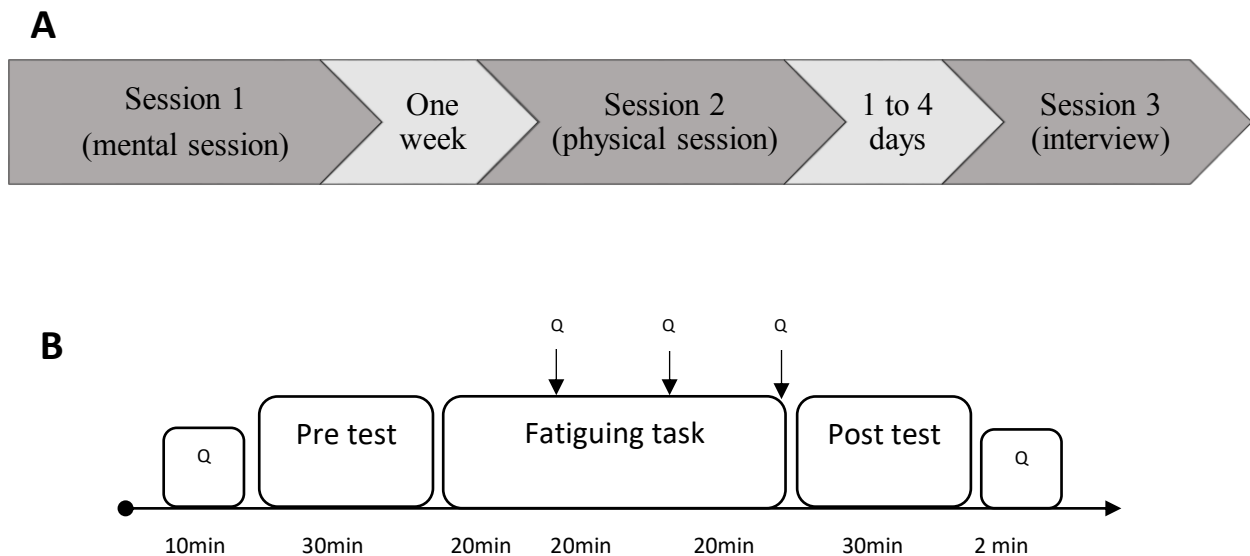
All participants were given instructions to sleep for at least 7 hr, refrain from the consumption of alcohol, avoid smoking, and not to practice vigorous physical activity the day before each visit. Participants were also instructed not to consume caffeine at least 3 hr before testing and were asked to declare if they had taken any medication or had any acute illness, injury, or infection.

Then, a semi-structured individual interview was conducted via Zoom with the participants to explore their experience during the fatigue induced visits.

Figure 12.

Panel A: Overview of the Study Procedure.

Panel B: Graphical Overview of the Experimental Protocol.



Note. Order and timing were the same for each subject and each visit. Q, questionnaires.

Fatiguing Tasks

Each fatiguing task was performed for 60 min and divided into three 20 min blocks. A 60 s rest was allowed between each block to assess perceptions of fatigue and effort intensity, arousal, and affective valence.

Mental fatigue task. Participants performed a modified-incongruent version of the Stroop colour-word task for 60 min on a computer (Stroop, 1992). The modified Stroop colour-word task has been previously used in the literature to induce mental fatigue (Pageaux et al., 2014; Pageaux et al., 2015). Four words (yellow, blue, green, red) were serially presented on the screen until the participant validated an answer or for a maximum of 2500 ms and were followed by a 1500 ms interval. Before each stimulus, a cue (i.e., cross) was presented for 250 ms. Participants were instructed to press one of four coloured buttons on the keyboard (yellow, blue, green, red) with the correct response being the button corresponding to the ink colour (yellow, blue, green, red) of the word presented on the screen. For example, if the word blue appeared in yellow ink, the yellow button had to be pressed. The word presented and its ink colour were randomly selected by the computer (100% incongruent). Inversely, if the word presented was framed, participants were instructed to press one of four coloured buttons on the keyboard with the correct response being the button corresponding to the word presented on the screen, the ink colour being a distractor. Twenty practice attempts were allowed before the inhibition task to ensure the participant understood the concept fully. If participants took too long to answer or if the answer was incorrect, auditory feedback was given. The ink-colour task represented 80% of the trials while the framed-colour task represented 20% of the trials.

Physical fatigue task. Participants performed a 60-minute fixed-power output cycling task on a cycle ergometer (Cyclus2, RBM elektronik-automation GmbH, Leipzig, Germany). Cycling power output was set to elicit a heart rate of 65% of the theoretical maximum heart rate (HR_{th-max}). HR_{th-max} was calculated using the formula $208 - (0.7 \times \text{age})$ (Tanaka et al., 2001). Power was fixed at 100 W at the beginning of the task. Then, power was either lowered by 5 W per minute or increased by 10 W per minute until achieving 65% of the HR_{th-max} . When 65% of the HR_{th-max} was

reached, power output remained fixed for the rest of the task. Before and immediately after the 60-minute cycling task, the participant performed a maximum voluntary cycling power test; a 6-second isokinetic sprint set at a cadence of 60 rpm (Staiano et al., 2018). Maximal cycling power output comparison between pre- and post- 60-minute cycling task was used to assess the presence of physical fatigue. Peak power output and mean power output over the 6 s were used as provided by the Cyclus2 software.

Quantitative Data

Pre- and Post- performance tests

Pre- and post-performance tests aimed at measuring the effects of fatigue-induced by prolonged physical and mental exertion on cognitive and physical performances. The measures collected in pretest served as baseline measures and were compared to the post-test measures to evaluate the impact of fatigue. The participant had a 60 s rest between each test.

n-back task. To measure cognitive performance, participants performed an n-back task at two different difficulties: low (n-1) and moderate (n-2). A series of letters were presented on a computer screen until the participant validated an answer or for a maximum of 1000 ms and were followed by a 583 ms interval. Before each stimulus, a cue (i.e., cross) was presented for 250 ms. Participants were asked to indicate via a computer mouse whether the letter presented was the same (left click) or different (right click) from the n-back letter (n-1 or n-2). Each task lasted 25 (n-1) to 30 (n-2) seconds and was repeated three times per difficulty. A 30 s pause was allowed between each repetition to quantify the perception of effort required to complete the task. Performance was measured by analyzing the participant's response to each stimulus via the following parameters: response accuracy, reaction time, lapses of attention (no answer provided). Each trial consisted of 25% target and 75% non-target letters. This test was created, performed, and analyzed via SuperLab (Cedrus Corporation, CA, USA).

Box and Block Test (BBT). The Box and Block Test measures gross manual dexterity (Mathiowetz et al., 1985). Participants performed two trials of a modified version of the Box and Block Test in which they followed a tempo (0.75 and 1 Hz) imposed by a metronome (Payen de la Garanderie et al.). Perception of effort was reported at the end of each trial.

Handgrip task. To measure maximal handgrip force production, participants performed three 3 s isometric maximal voluntary contractions (MVC) using their dominant hand. Between each contraction, participant had a 30 s rest. The task was performed using a grip force transducer (MLT004/ST, AD Instruments). Participants were seated in an adjustable chair, the height of which was adjusted to achieve a 90° knee bend. All tasks were performed in a controlled position with the elbow at 90° to ensure that the dynamometer was always held in the same position to maximize force reproducibility. Peak force was analyzed via PowerLab (PL3508, AD Instruments)

Cycling task. To measure the impact of fatiguing tasks (mental and physical) on the perception of effort during a locomotor exercise, participants performed a submaximal cycling task. Participants performed a continuous 6-minute cycling bout at two intensities (3 min per intensity). Minutes 0-3 were performed at 75 W and minutes 3-6 at 125 W. Perception of effort was reported at 0'30", 2'30", 3'30" and 5'30". The two scores per intensity were average for data presentation. Heart rate and breathing rate were recorded continuously during the six minutes and averaged for each intensity. This pre-test cycling task was also used as a warm-up for the 60-minute physical fatigue task.

Psychological Measurements

Perception of fatigue. To assess the participant's perceived level of fatigue (i.e., feeling tired and decreased energy (Le Mansec et al., 2018), a visual analog scale (VAS) was used. Participants were asked to put a mark on a 100 mm horizontal line with bipolar end anchors (0 mm = not at all tired; 100 mm = extremely tired) to indicate how they felt "right now". The VAS score was determined

by measuring (in mm) the distance from the left edge of the line to the mark made by the participant. Perceived fatigue level was measured before pre-testing, at the end of each block of the fatiguing task and after post-testing.

Perception of effort. As the perception of effort is the only variable altered by both physical and mental fatigue (Pageaux et Lepers, 2016) we monitored it during the various tasks described above. The perception of effort is defined as “the conscious sensation of how hard, heavy and strenuous exercise is” (Marcora, 2010b; Pageaux, 2016). Standardized explanations of the scale were given to each participant before the pretest (Pageaux et al., 2020). The CR100 scale (Borg et Kaijser, 2006) was used to measure the perception of effort of each task (i.e., to quantify the physical effort expended during the task). Perception of effort was measured at the end of each test and at the end of each block of the fatiguing task.

Affective valence. Affect is measured with the Feeling Scale and the Felt Arousal Scale and is known to be altered with acute exercise (Astorino et al., 2012). The Feeling Scale (Hardy et Rejeski, 1989) was used to assess affective valence along a pleasure-displeasure continuum. Participants had to score an 11-point rating scale, ranging from (I feel) “very bad” (-5) to “very good” (+5). Affective valence was measured at the end of each block of the fatiguing task.

Arousal. The Felt Arousal Scale (Svebak et Murgatroyd, 1987) was used to assess participants perceived activation. Participants had to indicate their level of activation on a 6-point scale ranging from low arousal (1) to high arousal (6). Arousal was measured at the end of each block of the fatiguing task.

Subjective workload. The National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) (Hart et Staveland, 1988) was used to assess subjective workload. The NASA-TLX is composed of six subscales: mental demand, physical demand, temporal demand, performance, effort, and

frustration. Participants had to score each item on a scale divided into 20 equal intervals anchored by a bipolar descriptor (e.g., high/low). This score was multiplied by 5, resulting in a final score between 0 and 100 for each of the six subscales. Participants completed the NASA-TLX at the end of the 60-minute fatiguing task.

Physiological Measurements

Heart rate was recorded continuously throughout visits using a heart rate monitor (MLAC35/ST, AD Instruments), with an acquisition rate of 1 k/s. Data analysis was automatically performed by the LabChart software.

Breathing rate was recorded continuously throughout visits using a respiratory belt transducer (TN1132/ST, AD Instruments). The respiratory belt was fixed on the participant's chest, with an acquisition frequency of 1 k/s. Data analysis was automatically performed by the LabChart software.

Qualitative data

One to four days following the second visits at the laboratory, each participant completed one individual, semi-structured interview with author CFB.

Interview. An approximately 30-minute open-ended semi-structured interview was conducted to collect information related to the participant's experience of fatigue, perception of effort and performance. The interview was piloted by CFB with co-authors JC and BP and a few minor adjustments were made to improve the wording of the questions. Due to the COVID-19 pandemic, all interviews were conducted via Zoom. Participants were also asked to reflect their experience using methods such as video recordings and photovoice (see below). All the interviews were conducted in French and transcript verbatim. Quotes used were translated in English by CFB. The interview guide is available in appendix.

Video recordings. Each fatiguing task (i.e., cycling task inducing physical fatigue and Stroop task inducing mental fatigue) was video recorded. The video camera was placed facing the participant to capture their upper body and face. Nine 20-second video segments were extracted from the beginning, middle and end of the mental fatiguing task (i.e., Stroop task) and the physical fatiguing task (i.e., cycling task). A total of 18 video segments were presented to participants during their interview. Video segments were used to help participants recall and describe the thoughts, feelings, and emotions during the mental and physical fatigue sessions. The video segments shown to participants were later linked to their perception of effort scores measured during the fatiguing task, as well as their interview data. Each participant only viewed their own footage.

Photovoice. This technique was used to gather a more detailed understanding of participants' lived experiences and perspectives in this study (Caron et al., 2017; Lal et al., 2012). After each of the two visits, participants were instructed to take (or retrieve) at least one photo or image (e.g., object, element of nature...) illustrating one or more states of fatigue experienced. Participants were asked to send these photos or images to CFB before the interview. During the interview, these images were shared, and participants were asked to explain what each photo represented in relation to fatigue and their lab visits.

Data analysis

Quantitative data were analysed descriptively for each participant and were linked to qualitative data. Interviews were transcribed verbatim, and a deductive analysis was conducted. Each interview was read multiple times to familiarize with the data. Key segments that described the participant's experience were identified. The interview data were analyzed following the guidelines established by Braun et al. (2016) for thematic analysis. Thus, similarities and differences (i.e., themes) were identified through several steps: (a) data familiarization, (b) coding, (c) theme identification, (d) theme verification, (e) theme definition and naming, and (f)

writing up the results. Codes and themes were developed based on their relevance of the quantitative data (e.g., psychological questionnaires, performance). Themes were decided upon discussion among all three researchers. Each participant's interview was analyzed individually, as we were not interested in comparing themes across participants.

3. Results

The purpose of this study was to explore the experience of fatigue from the participant's perspective. Relating quantitative objective and subjective data to participants' experience (qualitative data) allows us to learn more about how prolonged mental and physical exertion had led to fatigue induction or not, and how it affected each participant. Each participant will be presented individually, including quantitative (e.g., psychological questionnaires and physiological measures) and qualitative data (e.g., interviews quotes, photovoice). All data is available in appendix.

Participant 1 – Endurance-Trained Male

The endurance-trained male felt that the prolonged mental exertion was fatiguing whereas he said that he did not feel fatigued by the prolonged physical exertion.

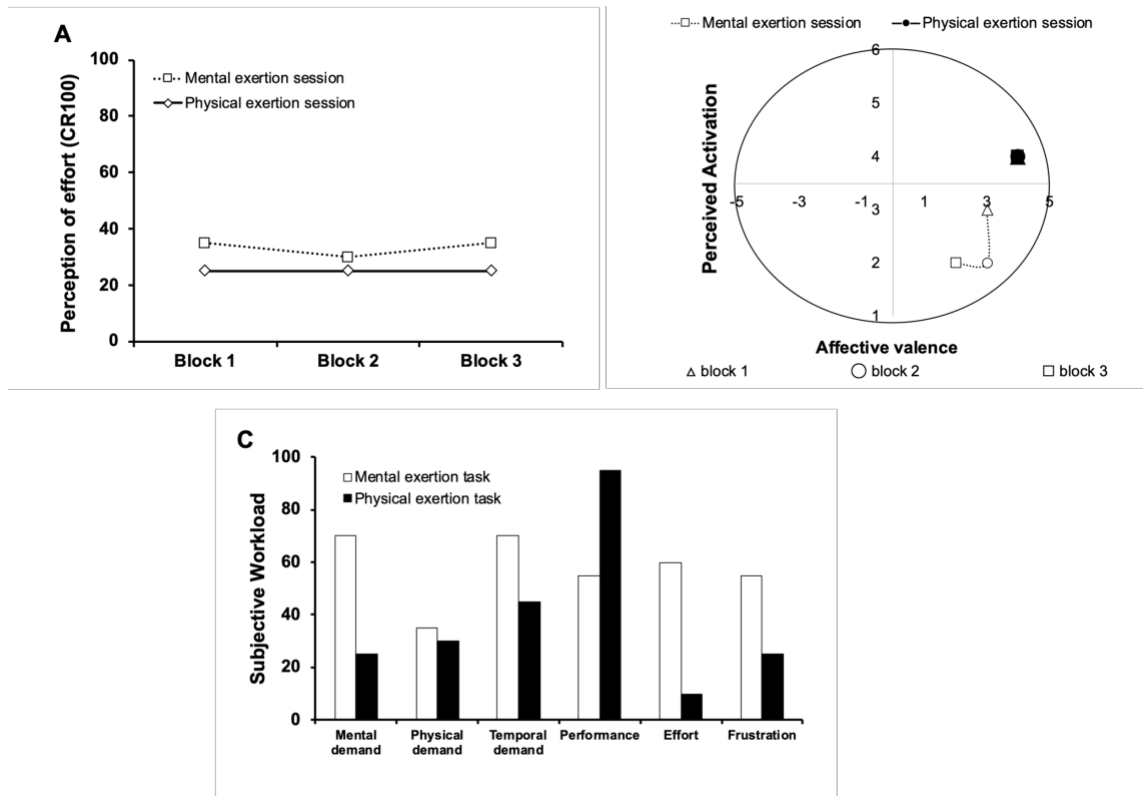
During the interview, the endurance-trained male said that he felt that the prolonged mental exertion affected him more than the prolonged physical exertion which was consistent with his NASA-TLX as demonstrated in Figure 13 (panel C). We can see that the mental session was more mentally, physically, and temporarily demanding. Moreover, he invested more effort in the mental exertion task as we can see on his subjective workload report and his perception of effort report (panel A). Therefore, we observe that solely the mental exertion session may have induced fatigue. Although the endurance-trained male noted he felt fatigued during the mental session (e.g., “for the mental session, I felt really tired, I felt like my eyes were closing, I really needed to move to not fall asleep and try to stay focused”), he also mentioned that fatigue was only transient.

Figure 13.

(Panel A) Participant 1: Endurance-Trained Male’s Evolution of the Perception of Effort During Each 20-minute Block

(Panel B) Participant 1: Endurance-Trained Male’s Evolution of Perceived Activation and Affective Valence During Each 20-minute Block

(Panel C) Participant 1: Endurance-Trained Male’s Subjective Workload (NASA-TLX)



Note. (Panel B) Endurance-trained male’s affective valence and perceived activation stayed stable (4;4) during the 60-minute of cycling task (physical exertion session).

During the interview, we asked participants to show us pictures or images that reminded them of the fatigue they experienced during the sessions. The endurance-trained male chose a picture of someone sleeping in front of a screen to represent his mental session (see Figure 14, panel A) and explained:

Endurance-Trained Male: [this picture] is a good representation of how I felt during the task [...] I felt like at the beginning of the task it was pretty much okay but as the task went on, I think after about 10 minutes, I just started having more difficulty and I was making more mistakes and the beeps were waking me up and then I was [re]focusing.

This image appears to be consistent with his perceived activation that decreased between the first two blocks whilst his valence decreased between block 2 and 3 (see Figure 13, panel C).

Figure 14.

Participant 1: Endurance-Trained Male's PhotoVoice for Mental Exertion Session (Panel A) and Physical Exertion Session (Panel B)

Pour raison de droit des images, les photos ont été transmises aux évaluateurs, mais ne peuvent pas être présentement ajoutées sur cette page.

After showing the endurance-trained male video segments of him completing the mental and physical tasks, we showed him his ratings of perception of effort (related to the video segment, see Figure 13 panel A). The endurance-trained male said that he believed he could have reported a higher perception of effort during his mental session:

Endurance-Trained Male: The mental fatigue... after seeing the videos, I certainly could have [attributed a higher rating of perception of effort] than that. On the other hand, the small drop between block 1 and block 2, I quite agree... I think block 1 required more mental effort to get used to the task, block 2 was fine, then block 3 I was clearly falling asleep, so it became more difficult. [...] The thing is, it's associated with a perception of effort that you're currently doing. But I think my personal perception of effort is mostly related to physical effort rather than mental, so there should have been, I think, more disparity between the two fatigues.

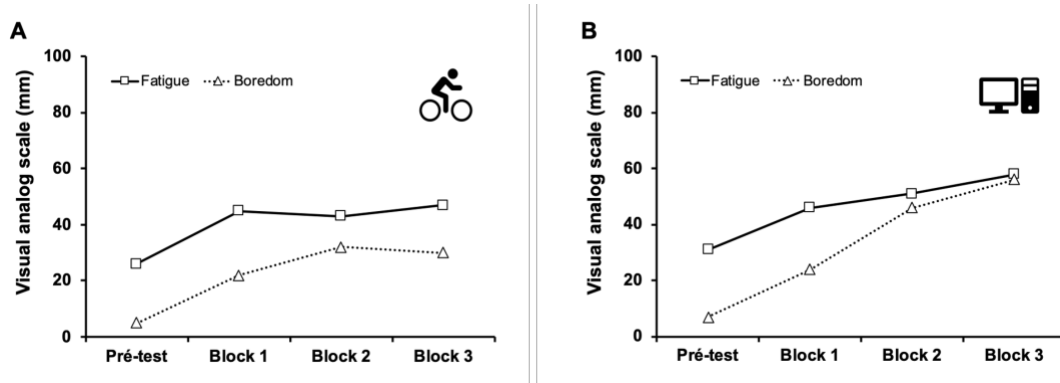
The endurance-trained male mentioned that he was not fatigued after the physical session (e.g., “I am not sure that I consider the physical session as fatiguing”). To explain this, he mentioned that the prolonged physical exertion felt more like an active recovery he does following a workout. During both sessions, affective valence, perceived activation, and perception of effort were reported after each block. Studies showed that exercise below the ventilatory threshold or lactate threshold do not have a negative impact on exercise and may even improve it (Ekkekakis et al., 2011). Though, when intensity is near maximal capacity, the positivity of affect should decline (i.e., left part of the circumflex model) (Ekkekakis et al., 2011). As we can see on Figure 13 (panel B), this participant stayed in the upper left quadrant, referring to high activation and pleasure, during the 60-minute of prolonged physical exertion, which could mean that the endurance-trained male was not fatigued by our protocol.

When comparing what he said during his interview to the subjective data he reported throughout both sessions, his feelings of fatigue reports show the increase of his fatigue (see Figure 15). It is interesting to note that his feelings of boredom are also increasing over time. Along with those results, when he shared his image representing a state of fatigue for the physical session, he chose a picture of someone looking at a clock (see Figure 14, panel A) and talked about the boredom he felt.

Endurance-Trained Male: I often looked at the time that I found long on this kind of task. It happens quite frequently when I follow a training that is quite boring. It's not necessarily the most physically fatiguing workouts but they still have a certain amount of mental fatigue in the sense that it's so boring, you are just waiting for it to end.

Figure 15.

Participant 1: Endurance-Trained Male's Boredom and Fatigue Reports During Physical Exertion Task (Panel A) and During Mental Exertion Task (Panel B)



Have we successfully induced fatigue?

When fatigue is induced by mental exertion, performance should be decreasing or maintained at a cost of a higher effort, whereas errors and time response should increase. The endurance-trained male had quite a stable performance over time. His second block was better with fewer errors and a decreased response time (see Table 2), although his perception of effort also decreased during this block. His performance decreased during the third block while his response time increased such as his perception of effort. Moreover, heart rate and breathing rate during the mental exertion session were stable over time (see Table 2). As previously mentioned, his visual analog scale for fatigue increased while on the task, as well as the participant reported, in his interview, that he felt fatigued after the mentally demanding task. We believe that we may have been successful in inducing fatigue by mental exertion.

When fatigue is induced by physical exertion, physiological data such as heart rate and breathing rate should increase to maintain performance over time. The endurance-trained male reached his 65% HR_{th-max} at a power output of 170W. Apart of breathing rate, physiological data do not seem to attest of fatigue. Although he told us that he did not feel fatigued after the physical

session, his visual analog scale reports say otherwise as we can see a small increase between each block (see Figure 15). However, it is important to note that boredom concomitantly increased. As a result, we do not believe that we were successful in inducing fatigue by physical exertion.

Table 2. *Participant 1: Endurance-Trained Male’s Fatiguing Tasks Data*

Mental exertion session	Block 1	Block 2	Block 3
HR mean (%)	38 ± 2	37 ± 3	36 ± 4
BR mean (bpm)	16 ± 2	15 ± 3	16 ± 11
Accuracy (%)	98.21	99.37	98.70
Errors (%)	1.79	0.63	1.30
Time response mean (ms)	844.46 ± 235.64	691.03 ± 187.32	746.09 ± 206.77
Physical exertion session	Block 1	Block 2	Block 3
HR mean (%)	67 ± 3	69 ± 3	66 ± 4
BR mean (bpm)	23 ± 4	24 ± 3	27 ± 10
<i>6-second isokinetic sprint</i>	Pre	Post	
Mean power output (W)			
Peak power output (W)			

Note. bpm: beats per minute; ms: milliseconds; HR: heart rate; BR: breathing rate; W: watts

Data for the endurance-trained male’s 6-second isokinetic sprint is not available due to equipment malfunction.

Participant 2 – Active Male

The active male reported during his interview that he did not feel fatigued by either the physical or mental prolonged exertion protocol. As we did not find his images for the PhotoVoice relevant (i.e., two pictures of cats with little information given), we will not present them but will display them in the appendix.

Even though the active male did not find either task fatiguing, he felt that the prolonged mental exercise was more fatiguing than the prolonged physical exercise.

CFB: If you considered these exercises as fatiguing, how do you explain the difference in your experience of fatigue?

Active Male: The computer exercise was more fatiguing than the bike.

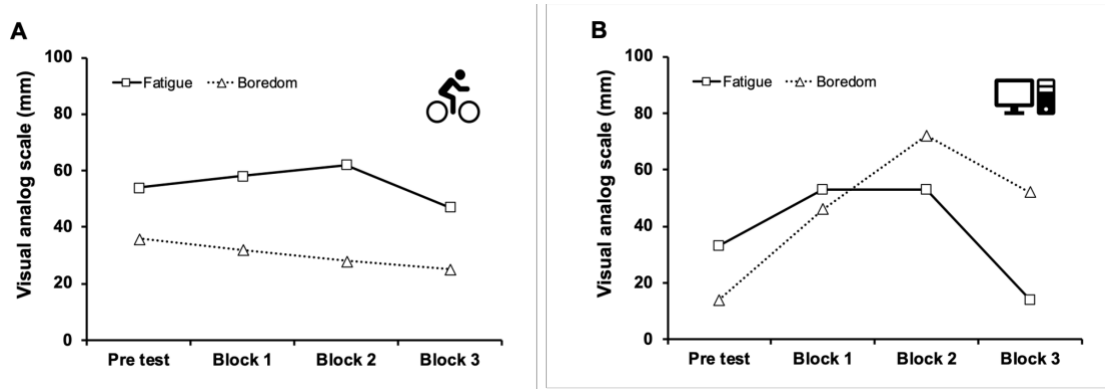
CFB: Why was it more fatiguing?

Active Male: Because it was boring, it was annoying. Every time you make a mistake, it gets on your nerves, it affects your mind. Whereas the bike was just a matter of pedaling.

As we can understand from this exchange, the active male found boring and was frustrated by the Stroop task (i.e., the mental exertion task). In his interview, he repeatedly mentioned that he felt terribly bored during the two sessions, and more particularly during the mental exertion session. As demonstrated in Figure 16 (panel B), his boredom significantly increased during block 1 and 2 of the mental exertion session. Additionally, his frustration (see Figure 17 panel C) is higher during the mental exertion session than during the physical exertion session. More than that, his perceived activation remained low during the 60-minutes of the Stroop task and his valence confirmed his displeasure of the task (i.e., lower left quadrant) during the mental exertion session (see Figure 17, panel B). Interestingly, when we compare his reported experience with his subjective data (visual analog scales filled throughout the visits), it tells otherwise. As we can see in Figure 16, his feelings of fatigue reports show that the physical exertion session was slightly more fatiguing than the mental exertion session.

Figure 16.

Participant 2: Active Male's Boredom and Fatigue Reports During Physical Exertion Task (Panel A) and During Mental Exertion Task (Panel B)



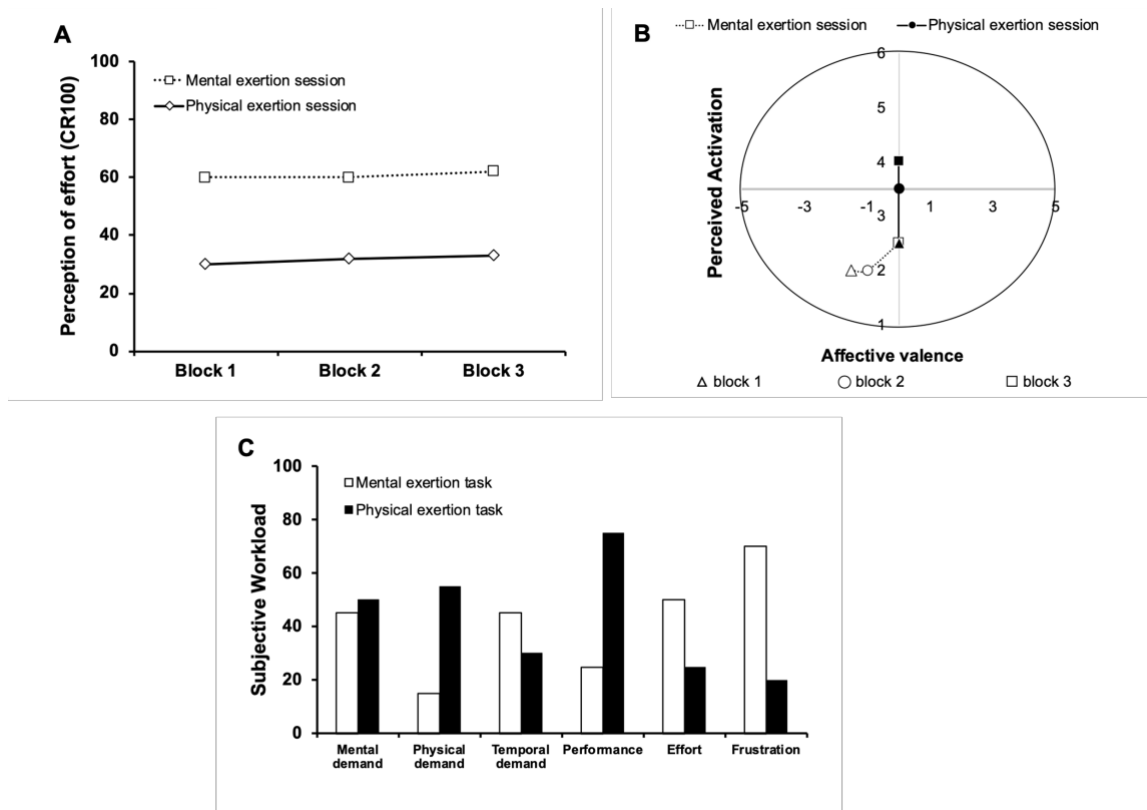
The active male said that, in general, he feels more in control when physically fatigued compared to when he is mentally fatigued. When asked to explain the difference in his experience of fatigue between the mental and the physical exertion sessions during the interview, the participant noted, “the mental exercise... I don’t know if it’s fatigue, but you want to stay focused. Whereas for the bike, you put your brain in automatic mode. You just pedal so the brain is, at least mine, was less tired”. Studies showed that exercise below the ventilatory threshold or lactate threshold do not have a negative impact on exercise and may even improve it (Ekkekakis and al, 2011). Though, when intensity is near maximal capacity, the positivity of affect should decline (i.e., left part of the circumflex model) (Ekkekakis and al, 2011). As we can see on Figure 17 (panel B), the active male stayed on a neutral valence, but his perceived activation kept growing throughout the three blocks. No drift towards high activation and displeasure has been noted, which could mean that the active male was not fatigued by our protocol.

Figure 17.

(Panel A) Participant 2: Active Male's Evolution of the Perception of Effort During Each 20-minute Block

(Panel B) Participant 2: Active Male's Evolution of Perceived Activation and Affective Valence During Each 20-minute Block

(Panel C) Participant 2: Active Male's Subjective Workload (NASA-TLX)



When shown videos segment of him doing the mental task and asked to describe the videos, the active male insisted, "I look tired, but I was more pissed off." As previously declared his subjective workload (see Figure 17, panel C) seems to corroborate his frustration. While he continued to watch the videos, he admitted that when doing the Stroop task, he thought it was more nervousness, but when reflecting, he accepts the fact that he looked tired. He differentiates that kind of fatigue from sleepiness.

When asked to describe what he was seeing in the video segments of the physical fatigue session, the active male said:

Active Male: I am wriggling, I am clowning around, because it's not yet hard on the legs. It's starting to get a little more fatiguing, so I laugh to get over the pain, the sweat, the exercise. I look more exhausted [as time goes by], but I keep talking. It was a little difficult, but I wasn't exhausted.

As he feels that he has more control during physical exertion, he finds his perception of effort reports (see Figure 17, panel A) in accordance with his perception of the situation: prolonged mental exertion was harder than prolonged physical exertion.

Have we successfully induced fatigue?

When fatigue is induced by mental exertion, performance should be decreasing or maintained at a cost of a higher effort, whereas errors and time response should increase. The active male's performance increased over time, his response time decreased between block 2 and 3 (see Table 3) and his perception of effort stayed stable (see Figure 17, panel A). Furthermore, heart rate and breathing rate were stable throughout the prolonged mental exertion (see Table 3). In his interview, the active male declared that he did not feel fatigued. However, his feelings of fatigue increased between pretest and end of first block, as shown by his visual analog scale filled throughout the session (see Figure 16, panel B). We do not believe that we were successful in inducing fatigue by mental exertion.

When fatigue is induced by physical exertion, physiological data such as heart rate and breathing rate should increase, which is not the case here (see Table 3). The active male reached his 65% HR_{th-max} at a power output of 110W. To attest of fatigue, we should also note a temporary reduction in cycling power output. Yet, the active male's 6-second isokinetic sprint mean and peak increased after the 60-minute physical exertion task (see Table 3). Subjectively, the active male reported in his interview that he did not feel fatigued. His reported feeling of fatigue collected via

a visual analog scale seems to agree with that thought. As we can see in Figure 16, his feeling of fatigue is increasing a little between block 1 and block 2 but decreasing between block 2 and 3. We do not believe that we were successful in inducing fatigue by physical exertion.

Table 3. *Participant 2: Active Male's Fatiguing Tasks Data*

Mental exertion session	Block 1	Block 2	Block 3
HR mean (%)	37 ± 4	37 ± 5	39 ± 3
BR mean (bpm)	22 ± 5	18 ± 5	17 ± 4
Accuracy (%)	94.90	98.10	99.17
Errors (%)	5.10	1.90	0.83
Time response mean (ms)	684.39 ± 184.73	691.06 ± 142.70	659.17 ± 118.97
Physical exertion session	Block 1	Block 2	Block 3
HR mean (%)	66 ± 3	68 ± 3	70 ± 3
BR mean (bpm)	29 ± 9	29 ± 10	31 ± 11
<i>6-second isokinetic sprint</i>	Pre	Post	
Mean power output (W)	552	623	
Peak power output (W)	810	918	

Note. bpm: beats per minute; ms: milliseconds; HR: heart rate; BR: breathing rate; W: watts

Participant 3 – Active Female

The active female found both sessions physically and mentally fatiguing, although it was only temporary.

During the prolonged physical exercise, the active female found the beginning of each block difficult, but after a few minutes she found “her rhythm (i.e., “rythme de croisière”) and her body was getting used to it”. She felt that the exercise made her feel fatigued, but only temporarily, as

she explained that when she returned home, she was not more tired than usual. Watching the video segments, she said, “after 20 minutes, I found my rhythm. I believe that my fatigue level was constant after that. It was not harder, not less hard, it was just the same.” Looking at her fatigue reports (i.e., subjective quantitative data), her perception of fatigue continued to evolve throughout the physical exertion session (see Figure 18).

When describing images shared with us as part of the PhotoVoice activity for the physical task (see Figure 19 panel B), she added:

Active Female: I felt like I had to pedal after something. Not like a lab rat, but just pedaling to exhaust myself... like a hamster spinning in its wheel or a horse chasing a carrot. Basically, pedaling after a goal you can't reach.

As we can see on her subjective workload (see Figure 20, panel C), she has been frustrated by the physical exertion task. Though, she reported high activation and pleasure during the 60-minute of physical exertion (see Figure 20, panel B).

Figure 18.

Participant 3: Active Female’s Boredom and Fatigue Reports During Physical Exertion Task (Panel A) and During Mental Exertion Task (Panel B)

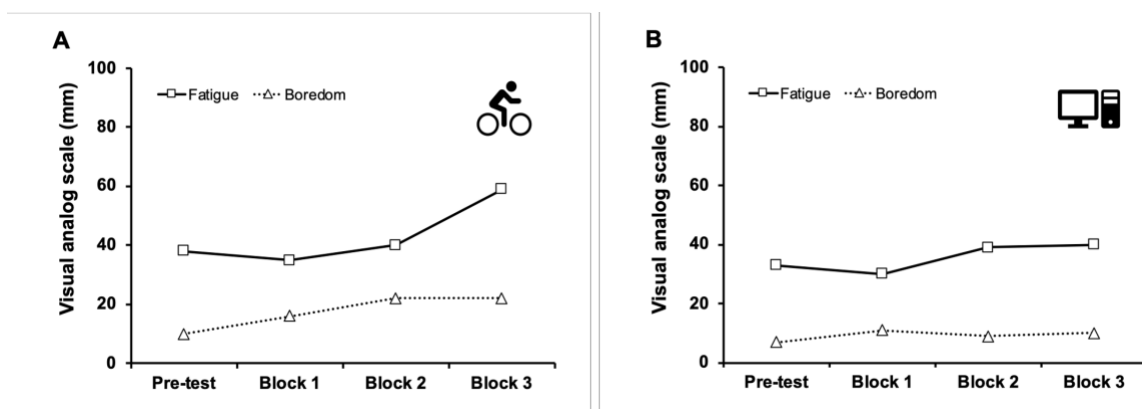


Figure 19.

Participant 3: Active Female's PhotoVoice for Mental Exertion Session (Panel A) and Physical Exertion Session (Panel B)

Pour raison de droit des images, les photos ont été transmises aux évaluateurs, mais ne peuvent pas être présentement ajoutées sur cette page.

Talking about the prolonged mental effort, she said she was stressed at first, “I had trouble remembering instructions, so I was really focused.” She added that as time went on, she became more and more amorphous and was on automatic pilot, she changed her strategy rapidly to isolate the colour of the word and associate it with the right button. She chose an image of a hypnotic wheel (see Figure 19 panel A) for the PhotoVoice activity to depict her experience of the mental fatigue task:

Active Female: It's like my brain went into a trance... I wasn't thinking, I was just associating the colour I saw with the right button. I didn't have to think, just press. For 60 minutes, it felt like I was hypnotized or in a trance.

During her interview, the active female reported that the Stroop task was more boring than the physical task, but that the mental session went faster as she did not feel there. However, her reported feelings of boredom, although there is not much difference, tells otherwise (see Figure 18). As we can see, her boredom increased over time during the physical exertion session whereas it stayed stable during the mental exertion session.

When she looked at her ratings of perceived effort (see Figure 20, panel A), she was initially surprised to see that for the physical session, her perception of effort increased while for the mental session it decreased. She even stated that she could have rated her mental effort lower. However, she analyzes the situation logically:

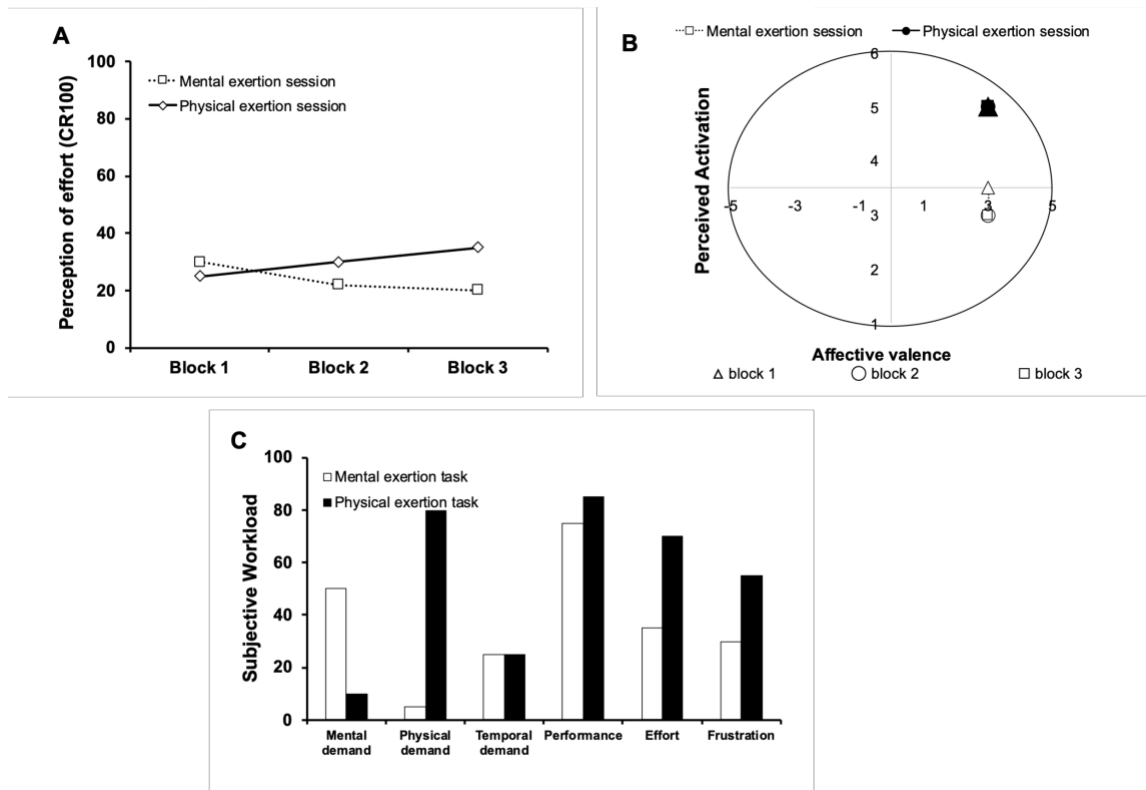
Active Female: When it's physical, my fatigue accumulates, so it's normal that it increases. I made a constant effort and to keep the same pace, I increased my effort. While for the mental session, my effort was decreasing as I went along. The more it went, the more I was on autopilot and fell asleep.

Figure 20.

(Panel A) Participant 3: Active Female's Evolution of the Perception of Effort During Each 20-minute Block

(Panel B) Participant 3: Active Female's Evolution of Perceived Activation and Affective Valence During Each 20-minute Block

(Panel C) Participant 3: Active Female's Subjective Workload (NASA-TLX)



Note. (Panel B) Active female's affective valence and perceived activation stayed stable (3;3) during the second and third block of the mental exertion session. Active female's affective valence

and perceived activation stayed stable (3;5) during the 60-minute of cycling task (physical exertion session).

Have we successfully induced fatigue?

When fatigue is induced by mental exertion, performance should be decreasing or maintained at a cost of a higher effort, whereas errors and time response should increase. The active female's performance and response time increased over time (see Table 4), but her perception of effort decreased (see Figure 20, panel A). Moreover, heart rate and breathing rate during the mental exertion session were stable throughout the prolonged mental exertion (see Table 4). However, subjectively, in her interview as well as in her visual analog scale for fatigue, the participant reported that she felt fatigue (see Figure 18, panel B). We believe that we may have been successful in inducing fatigue by mental exertion.

When fatigue is induced by physical exertion, physiological data such as heart rate and breathing rate should increase. The active female reached her 65% HR_{th-max} at a power output of 90W. To attest of fatigue, we should also note a temporary reduction in cycling power output. Yet, the active female's 6-second isokinetic sprint mean and peak increased after the 60-minute physical exertion task (see Table 4). Subjectively, the active female reported in her interview that she did feel fatigued, which agrees with her reported feeling of fatigue collected via a visual analog scale. Looking at her objective data (i.e., 6-second isokinetic sprint), we do not believe that we were successful in inducing fatigue by physical exertion. Nonetheless, looking at her subjective data (i.e., feelings of fatigue and interview), we could have been successful. Therefore, we consider her results ambiguous.

Table 4. *Participant 3: Active Female’s Fatiguing Tasks Data*

Mental exertion session	Block 1	Block 2	Block 3
HR mean (%)	39 ± 3	38 ± 4	37 ± 3
BR mean (bpm)	19 ± 6	17 ± 8	17 ± 6
Accuracy (%)	95.34	98.84	99.29
Errors (%)	4.66	1.16	0.71
Time response mean (ms)	926.41 ± 261.10	947.10 ± 233.62	1010.10 ± 220.79
Physical exertion session	Block 1	Block 2	Block 3
HR mean (%)	73 ± 3	71 ± 3	74 ± 3
BR mean (bpm)	27 ± 6	28 ± 9	30 ± 10
<i>6-second isokinetic sprint</i>	Pre	Post	
Mean power output (W)	433	494	
Peak power output (W)	610	767	

Note. bpm: beats per minute; ms: milliseconds; HR: heart rate; BR: breathing rate; W: watts

Participant 4 – Non-Active Female

The non-active female had a very different experience between her two visits. This participant considered both the mental and physical task fatiguing. However, the participant performed well on the mental task, but was not able to complete the 60-minute cycling task because it was too physically demanding.

The non-active female explained, in her interview, that during the prolonged mental task she “hit a wall about halfway through the task”. She added, “it was hard to keep my eyes open, but I didn’t necessarily feel exhausted”. She considered the first 20 minutes (i.e., block 1) the most difficult, as she was getting used to the task. She also believes that as the first block was harder, it explains why her perception of effort was a bit higher than for the second and third block (see Figure 21, panel A). The second block was “a new beginning” she said. During this block, she found strategies

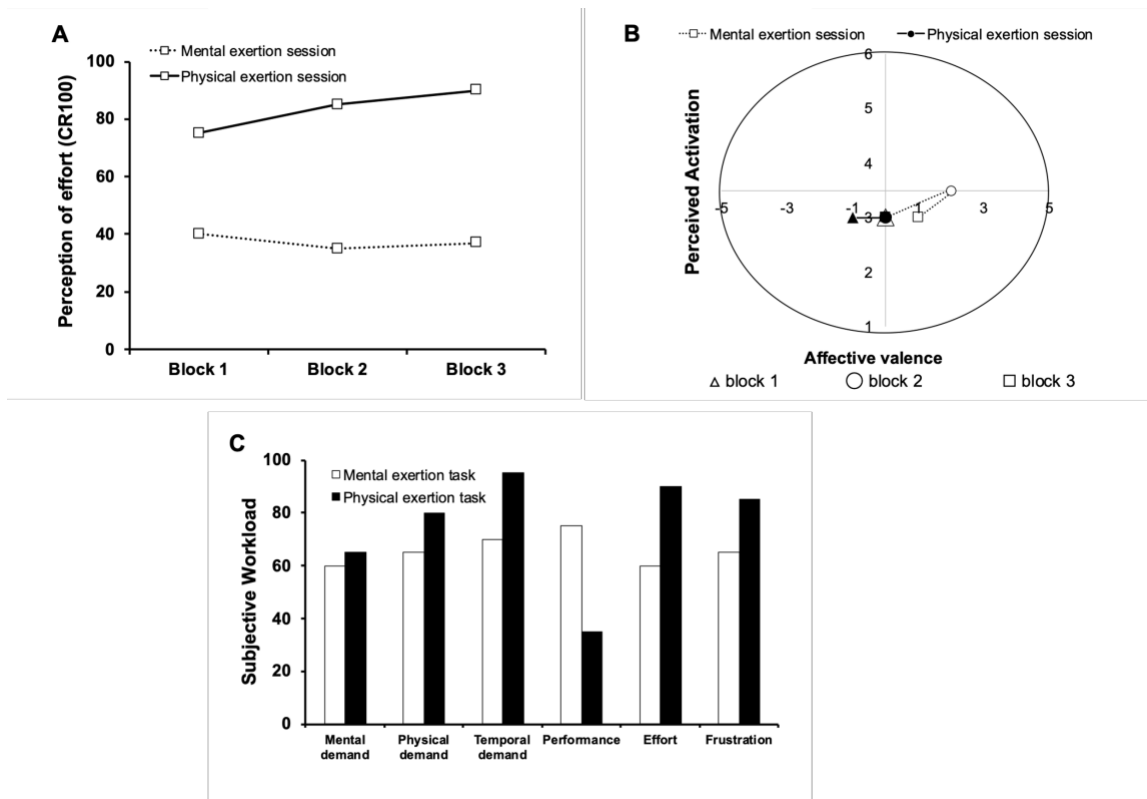
to avoid falling asleep like “giving little kicks under the table or changing sitting position regularly”. As time went on, she felt that it became more routine and less fatiguing. Nevertheless, her perceived activation and her valence reduced between block 2 and 3 (see Figure 21, panel B). When we compare what she said she felt in her interview and what she reported via a questionnaire filled throughout the visit, her perception of fatigue grew between pretest and block 1 as well as between block 2 and block 3 (see Figure 22).

Figure 21.

(Panel A) Participant 4: Non-Active Female’s Evolution of the Perception of Effort During Each 20-minute Block

(Panel B) Participant 4: Non-Active Female’s Evolution of Perceived Activation and Affective Valence During Each 20-minute Block

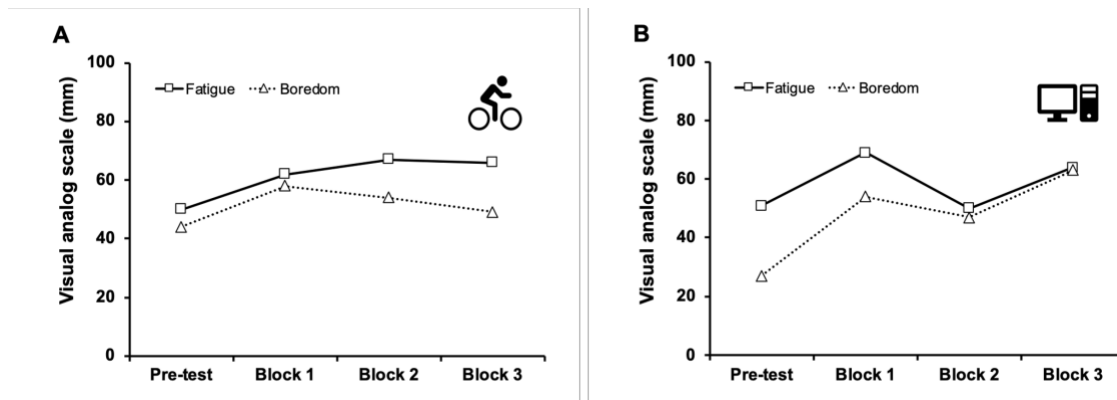
(Panel C) Participant 4: Non-Active Female’s Subjective Workload (NASA-TLX)



Note. (Panel B) Non-active female's affective valence and perceived activation stayed stable (0;3) during the second and third block of the physical exertion session.

Figure 22.

Participant 4: Non-Active Female's Boredom and Fatigue Reports During Physical Exertion Task (Panel A) and During Mental Exertion Task (Panel B)



During the interview, when asked to present some images related to a state of mental fatigue for the photovoice, she exhibited two (see Figure 23). The first image (A) represents the automatism of the task. In her own words, she said, “the task was automatic and because of that I was just in a big empty space, like free-falling and falling in a space where there is nothing else”. Similarly, she shared her thoughts for the second image (B) and said “at the beginning I found it very difficult but at the end I found it relatively soothing” comparing it to a calm lake. She added:

Non-Active Female: After 10 to 15 minutes, I realized how redundant and easy the task was, so until then I found it exhausting and couldn't wait for it to be over, but then it got unstuck and it just became a routine. You don't think about it anymore, kind of like breathing; it's constant, repetitive.

Figure 23.

Participant 4: Non-Active Female's PhotoVoice for the Mental Task

Pour raison de droit des images, les photos ont été transmises aux évaluateurs, mais ne peuvent pas être présentement ajoutées sur cette page.

The prolonged physical task was much harder for the non-active female. During the interview, she expressed that “after the cycling task, it was foggier [in her head], more complex. It took a lot of mental effort to continue cycling.” Her subjective workload, a questionnaire she filled after completing each prolonged task, demonstrated that the physical task was more demanding and effortful than the mental task (see Figure 21, panel C).

When shown videos segment of her doing the physical task and asked to describe the videos, she said

Non-Active Female: At the beginning it was okay. After 10 minutes, it was really rough. I was stressed because I didn't feel well, and it was getting worse. By the end of the first block, I was nauseous, so I was closing my eyes because I felt like it was more serene.

Normally, rests between blocks are 60-second long and allows the completion of visual analog scales. The non-active female needed more time before starting the next block. She took approximately 4 minutes. During the second block, the non-active female was still not feeling well, and she was not able to continue without taking a break. Therefore, she took a 3-minute and half rest time about halfway through the block. During her interview, she reflected on that experience: “without that [break] I wouldn't have been able to finish block 2 and I wouldn't have started block 3”. She also mentioned that “during the second block, it hurt my legs to keep up

and I could feel my heart beating in my head. I was very fatigued mentally and physically; it was starting to get heavy.”

Before starting the last block, she extended her break to a 4-minute pause. CFB noted that even though she was not feeling well, she was more joyful and was joking before the beginning of the last block. The non-active female mentioned that she “felt relatively better but was exhausted from doing this exercise. Mentally I was exhausted. I was like I’ve been through enough, after 50 minutes I was done.”

During the interview, she shared three photos related to the physical task (see Figure 24). The first photo (A) “demonstrates the chaos, the fogginess in my head. Just thinking was hard.” The second one (B) is in line with the first and shows “how very busy / very dizzy it was. Everything was blurry.” Regarding the last picture (C) she said,

Non-Active Female: This is me drowning at the bottom of the ocean. You’re in it and you’re trying to find the end... you’re tired and you’re almost out of it, but at the same time when you’re in the water you want to get out but it’s far away, you know it’s coming, you’re okay but you’re in a state where you need help, where I needed to get out of the water.

Figure 24.

Participant 4: Non-Active Female’s PhotoVoice for the Physical Task

Pour raison de droit des images, les photos ont été transmises aux évaluateurs, mais ne peuvent pas être présentement ajoutées sur cette page.

When showed how she rated her perception of effort (see Figure 21, panel A), she admitted:

Non-Active Female: For the physical task, I could have put the points even higher. I was a little embarrassed to say it was my 100 because I wanted to be better than that. I probably could have rated 5 to 10 more for each point.

She compared her experience of fatigue during the physical and mental exertion tasks and said, “the physical task was continuous, it was tougher and tougher while the mental one, you had to get used to the repetition and then it got easier”.

Have we successfully induced fatigue?

When fatigue is induced by mental exertion, performance should be decreasing or maintained at a cost of a higher effort, whereas errors and time response should increase. The non-active female’s performance increased over time (see Table 5). While her reaction time decreased between block 1 and 2 just like her perception of effort, both increased between block 2 and 3. In her interview, the non-active female reported that she did feel fatigued. Although her perceptions of fatigue reports show a decrease between block 1 and 2, it first increased between the pre-test and block 1 and then between block 2 and 3 (see Figure 22). We believe that we may have been successful in inducing fatigue by mental exertion.

When fatigue is induced by physical exertion, physiological data such as heart rate and breathing rate should increase. As the participant took many rests periods during blocks and longer pauses in-between blocks, physiological data presented in Table 5 need to be taken lightly. The ergometer’s minimal power output of 60 W was reached after 7 minutes, and her heart rate was still around 85% of her HR_{th-max} at that moment. Her heart rate never reached 65% HR_{th-max} . To attest of fatigue, a temporary reduction in cycling power output should be noted. The non-active female’s 6-second isokinetic sprint mean, and peak decreased after completing 50-minute out of the 60 (see Table 5). Subjectively, she said in her interview that she felt fatigued by the prolonged physical exertion. Additionally, her reported perception of fatigue, collected via a visual analog

scale, increased throughout the visit. We believe that we may have been successful in inducing fatigue by physical exertion.

Table 5. *Participant 4: Non-Active Female's Fatiguing Tasks Data*

Mental exertion session	Block 1	Block 2	Block 3
HR mean (%)	52 ± 2	46 ± 4	42 ± 4
BR mean (bpm)	25 ± 11	23 ± 11	24 ± 13
Accuracy (%)	96.61	97.54	98.41
Errors (%)	3.39	2.46	1.59
Time response mean (ms)	858.10 ± 218.92	836.59 ± 177.41	884.07 ± 193.28
Physical exertion session	Block 1	Block 2	Block 3
HR mean (%)	88 ± 4	79 ± 5	84 ± 7
BR mean (bpm)	37 ± 14	34 ± 13	35 ± 16
<i>6-second isokinetic sprint</i>	Pre	Post	
Mean power output (W)	405	358	
Peak power output (W)	569	512	

Note. bpm: beats per minute; ms: milliseconds; HR: heart rate; BR: breathing rate; W: watts

4. Discussion

Using an explanatory sequential mixed method approach, and a multiple case study design, the purpose of this study was to explore the experience of fatigue from the participant's perspective. To the best of our knowledge, this is the first study to use mixed methods to explore participants' objective and subjective experiences of fatigue induced by mental and physical effort in a laboratory setting. Our results are somewhat contradictory in that there is some discrepancy between some objective and subjective data regarding the induction of fatigue.

When using the operational definition of fatigue induced by mental exertion (i.e., an increase in feelings of tiredness and/or a decrease in cognitive performance) (Boksem et Tops, 2008), our results suggest that three out of four participants seem to have been fatigued by our protocol (i.e., the endurance-trained male, the active female, and the non-active female). When using the operational definition of fatigue induced by physical exertion (i.e., decrease in maximal force or power production capacity) (Gandevia, 2001), our results suggest that only one participant (i.e., the non-active female) was fatigued by our protocol. Indeed, she is the only one who had a decreased performance during the 6-second isokinetic sprint. Yet, it is interesting to note that even though the active female increased her performance during the 6-second isokinetic sprint, meaning that we failed to objectively attest of fatigue induction, her subjective data demonstrates otherwise. Indeed, her perception of effort and her feelings of fatigue increased over time, and she even described that she had been fatigued during the interview.

Participants for whom fatigue was induced

We believe that we were successful in inducing fatigue by physical exertion for the non-active female. Fatigue induced by physical exertion is characterized by a decrease in maximal force or power production capacity (Gandevia, 2001). Her objective data (power production, performance, etc.) attest of fatigue by physical exertion. Indeed, her power production capacity

following the constant load cycling exercise decreased. This result is also in accordance with previous studies on the impact of prolonged cycling exercise on power production capacity (e.g., Hopker et al., 2017). Moreover, when fatigued by physical exertion, performance on a subsequent physical task should be negatively impacted (Marcora et al., 2008). Her performance tests' results demonstrate that completion of a prolonged cycling exercise increases perception of effort whether it's on a psychomotor task (i.e., box and block test) or a subsequent cycling task which is in accordance with previous studies (Pageaux et Lepers, 2016). Perception of effort reflects the central processing of the corollary discharge associated with central motor command (Bergevin et al., 2021; Marcora, 2010b; Pageaux, 2016). The higher perception of effort perceived during and after the constant load cycling exercise could therefore reflect an increase in the central motor command to compensate for changes in neuromuscular properties (Bergevin et al., 2021; de Morree et al., 2012). Her performance tests' results also demonstrate that completion of a prolonged cycling exercise decreases accuracy on a subsequent cognitive task. Though, research on the impact of physical fatigue on a subsequent cognitive task have mixed results. This finding is in contradiction with previous meta-analysis who found an improvement on a subsequent cognitive task completed immediately following an acute bout of exercise (Chang et al., 2012; Lambourne et Tomporowski, 2010). Fatigue induced by physical exertion could also be associated with an increased feeling of tiredness and lack of energy (Ament et Verkerke, 2009). Her subjective data also attest of fatigue. As we have seen, her reported feelings of fatigue increased over time, and she stated in her interview that the constant load cycling exercise was fatiguing. We have found only one study who assessed the subjective feelings of fatigue after a fatiguing tennis table task (Aune et al., 2008) but as they did not discuss this specific result it is difficult to link it to our study. Therefore, we suggest that future studies control the subjective feelings of fatigue to acknowledge (or not) the objective quantitative data.

We also believe that we were successful in inducing fatigue by mental exertion for the endurance-trained male, the active female, and the non-active female. Looking at the objective data of those three participants, we are confident that fatigue by mental exertion was induced. Indeed, the endurance-trained male's accuracy decreased, and his response time increased between the last two blocks of the mental exertion task. Both female participants had their accuracy and their

response time increased over time. This suggests a decreased cognitive performance and therefore the induction of a state of mental fatigue. Performance to a subsequent cognitive task should also be negatively impacted when mentally fatigued (van der Linden et Eling, 2006). The endurance-trained male's accuracy in the n-back moderate difficulty (i.e., n-2) decreased in the post-performance test compared to the pre-test. For the active female, her results on the n-back (i.e., n-2) show an increase of accuracy, but her response time increased such as her perception of effort, which again certify that fatigue by mental exertion was well induced. Only the non-active female's accuracy on the n-back moderate difficulty increased in the post-performance test compared to the pre-test while her response time stayed the same and her perception of effort decreased. Moreover, perception of effort on a subsequent cycling task is known to increase in the presence of fatigue, a consequence that happened to all three participants (Marcora et al., 2009; Pageaux et al., 2013). Thus, our results are in accordance with previous studies that demonstrate that completion of a prolonged mental exertion task has a negative impact on a subsequent cognitive (van der Linden et al., 2003) and physical task (Marcora et al., 2009). Their subjective data also suggest the induction of a state of mental fatigue. All three participants had their feelings of fatigue (measured via a visual analog scale) increased and reported being fatigued by the Stroop task during their interview. Fatigue induced by mental exertion is defined as an increase in feelings of tiredness and/or a decrease in cognitive performance (Boksem et Tops, 2008). Our results demonstrate that we were successful in inducing objective and subjective fatigue with our mental exertion protocol.

Participants for whom fatigue was not induced.

We believe that we were not successful in inducing fatigue by physical exertion for the endurance-trained male and the active male. Results for the active male observed no decrease in power production capacity after completing the constant load cycling exercise. Yet, the gold standard measure to attest of muscle fatigue is a decrease in power production capacity (Gandevia, 2001). It is well known that when an individual must maintain a performance (i.e., a constant motor output) in the presence of fatigue induced by physical exertion, their effort will gradually increase

over time (Pageaux et Lepers, 2016). However, both the endurance-trained male and the active male's perception of effort stayed stable throughout the task. During the subsequent cycling and psychomotor tasks, their perception of effort stayed quite stable. Though, a higher perception of effort perceived after the constant load cycling exercise could reflect an increase in central motor control to compensate for changes in neuromuscular properties (Bergevin et al., 2021; de Morree et al., 2012). Their subjective experience of fatigue also does not attest of fatigue as both reported during their interview that they did not feel fatigued. Their feelings of fatigue measured during the 60-min of constant load cycling stayed stable (endurance-trained male) or decreased (active male). Results display no ambiguity; the constant load cycling task did not induce fatigue, either objectively and/or subjectively.

Due to the COVID-19 pandemic, sessions in the laboratory environment were reduced to minimum. Therefore, we opted for a constant cycling task at 65% of HR_{th-max} instead of adding an incremental test. Our results demonstrate that our constant-load cycling task was not well dosed for fit participants. To avoid repeating this mistake, it seems crucial to fix a load based on VO_2max or maximal aerobic power output (MAP). As for the cycling bouts performed at 75W and 125W, relative power output instead of absolute power output would be better.

We believe that we were not successful in inducing fatigue by mental exertion for the active male. Mental fatigue is defined as an increase in subjective feelings of fatigue and/or a decrease in cognitive performance (Boksem et al., 2006; Boksem et Tops, 2008; Pageaux et Lepers, 2018). Objectively, the active male's accuracy increased, and his response time decreased between the last two blocks of the Stroop task. Previous studies also demonstrated that, when mentally fatigued, performance on a subsequent cognitive task should decrease (van der Linden et Eling, 2006) and that perception of effort on a subsequent cycling task could increase (Marcora et al., 2009; Pageaux et al., 2013). Though, the active male's performance on the n-back (n-2) increased, his response time decreased and his perception of effort on the mental task, on the psychomotor task and on the cycling task all decreased. Thus, as his performance got better over time, we cannot certify that mental fatigue was induced objectively. Looking at his subjective data, his

feelings of fatigue increased only between pretest values and block 1. He also stated in his interview that he did not feel fatigued by the task. This could mean that the task was not demanding enough and therefore would suggest that even subjectively we did not induce a state of mental fatigue. Hence, for this participant, subjective and objective data are in accordance.

All participants increased their performance between block 1 and 2 of the Stroop task. This could mean that there was a learning effect between blocks. To avoid this improvement phenomenon in a future study, a familiarization session consisting of three 20-minute blocks rather than only 20 trials could prevent this. Another solution could be to make the task more difficult by engaging even more cognitive flexibility and inhibition (Mangin et al., 2021). Therefore, the double-instructions could be increased to a 50/50 proportion (i.e., our proportion was 80% ink-colour and 20% name-colour).

Participants for whom data seem contradictory.

Data for the active female's physical exertion session seem contradictory. As her power production capacity following the constant load cycling exercise increase, it suggests that we were not successful in inducing fatigue by physical exertion. When physically fatigued, participants' perception of effort should increase on a subsequent cycling task (Pageaux et Lepers, 2016). Yet, her perception of effort decreased, which add to our certainty that we did not successfully induce fatigue by physical exertion objectively. Nevertheless, fatigue induced by physical exertion could be associated with an increased feeling of tiredness (Ament et Verkerke, 2009). In the active female's case, her subjective feelings of fatigue increased over time. As well, she reported in her interview that she did feel fatigue by the constant load exercise. This perfectly demonstrates the contradiction that can result from the definition of fatigue and its objective and subjective data used to quantify. The active female's case study demonstrates that we were successful in inducing only subjective fatigue while her power production capacity was unaffected. Therefore, is fatigue induced by physical exertion solely a matter of decreased power production capacity or should subjective feelings be included in its definition? With this finding, fatigue induced by physical exertion could therefore be redefined as a decrease in maximal force or power production

capacity and/or an increase in feelings of tiredness. Before jumping to conclusions and adding to the physical fatigue definition a subjective component, it would be important to reproduce those findings to a larger population.

Fatigue and boredom

Participants mentioned during their interview that they felt bored, which led us to question if it affected their ratings of fatigue. As seen in the results section, some of them had their feelings of fatigue and boredom tend to increase and decrease simultaneously (e.g., see Figure 15). In the literature, previous studies confirmed that boredom can be associated with negative affect, such as displeasure, sadness or anger (Eastwood et al., 2012). Another study showed that participants who faced a boredom condition reported more fatigue compared to a cognitive effort condition (Milyavskaya et al., 2019). Wolff et Martarelli (2020) found that continuing a boring activity is self-control demanding. Trying to replicate the ego-depletion effect, Mangin et al. (2021) found that the Stroop task used to induce mental fatigue also induced boredom. Martarelli et al. (2022) resumed the latest evidence on boredom and fatigue: boring activities can lead to sensations of exertion (Bieleke et al., 2021), fatigue (Milyavskaya et al., 2019), or frustration (Westgate et Wilson, 2018).

The non-active female's boredom and fatigue are interesting as well. Her feelings of fatigue continuously increased over time while her boredom increased during the first block, but then decreased. Looking at her data, it seems that there is an interaction between boredom and fatigue as both variables increased during the first block. Though, this participant must have been able to dissociate her feelings of fatigue from her feelings of boredom as we can see that the first variable continued to increase while the second decreased. When an individual must maintain a performance (i.e., a constant motor output) in the presence of fatigue induced by physical exertion, their effort will gradually increase over time (Pageaux et Lepers, 2016). In her case, her perception of effort increased over time during her constant load cycling exercise at 60 W. This means that she needed to invest more resources to pursue the task.

It is not possible to determine if boredom generated the feelings of fatigue or vice versa, but regarding our results it seems to be linked (Mangin et al., 2021). Thus, we should ensure that the chosen fatiguing protocol is not boring and control boredom as a confounding factor of fatigue.

Practical applications

Our results have shown discrepancy between the quantitative measures and the qualitative measures. As we observed in our study, participants expressed their experience during their interview that were not necessarily consistent with the data reported and measured during sessions. Therefore, our study questions whether researchers can objectively measure what participants are subjectively experiencing?

It also appears that we can successfully induced fatigue by altering the subjective markers of fatigue without altering the objective markers. Therefore, is the definition of fatigue induced by physical exertion solely a matter of decreased power production capacity or should subjective feelings be included in its definition? With this finding, fatigue induced by physical exertion could therefore be redefined as a decrease in maximal force or power production capacity and/or an increase in feelings of tiredness. Future research should expand our results with an increase sample size and in various populations to further validate this potential update of the definition.

Hence, we need to explore if the methods traditionally used in a laboratory setting to induce a state of fatigue are indeed inducing fatigue. As fatigue is well-known to manifest subjectively (e.g., increase feelings of tiredness) and not only objectively (e.g., decrease performance), future studies should try to identify which components people associate to fatigue (for example, extreme tiredness? Self-efficacy? Muscle weakness?). Moreover, future studies should investigate the experience of fatigue for different categories of people: active people, seniors, athletes, cardiovascular population, etc. Such systematic consideration, both objective and subjective markers of fatigue in a laboratory setting could help to better understand the exacerbating exercise-induced fatigue in specific pathologies where fatigue is clearly marked by an increase feelings of tiredness and exhaustion.

Limitations and perspective for future research

Beyond the limitations presented above and the COVID-19 pandemic restrictions, we would like to emphasize some other limitations. First, as this is a multiple-case pilot study, our results need to be reproduced with a larger population and with a protocol better adapted for each participants-category. Our protocol was not well adapted for the non-active female as her heart rate was above 65% of her HR_{th-max} for the entire constant load exercise duration that she ended after 50 out of the 60 minutes. As well, the endurance-trained male and the active male were not fatigued. As mentioned above, we therefore suggest fixing a load based on VO_2max or maximal aerobic power output (MAP).

Other parameters could have been measured such as the EMG signal to see if there were any compensation mechanisms used while fatigued. During dynamic exercise, it appears that local changes within the muscle cell can occur at supramaximal workloads far above the VO_2max (Ament et Verkerke, 2009). Consequently, it would have been interesting to see if there is a compensation mechanism in muscle cells when participants are subjectively fatigued.

It would be interesting for future research to control for social desirability or sociocultural factors like masculinity that may have resulted from the interaction between researcher (female) and participant (male).

Conclusion

The purpose of this study was to explore the experience of fatigue from the participant's perspective. We observed that three out of four participants were fatigued by mental exertion and that one out of four participants were fatigued by physical exertion, objectively and subjectively. We also observed that one participant was subjectively fatigued by physical exertion but not objectively. Therefore, the present study provides evidence that data, whether quantitative or qualitative and subjective or objective, are not always telling the same. As our results have shown, participants' experience does not always relate with what their data said.

Future studies should investigate if it is possible to dissociate subjective fatigue from objective fatigue during a prolonged physical task. Research should also explore the link between boredom and fatigue to determine if boredom generates feelings of fatigue or vice versa and if both constructs can be dissociated from feelings of fatigue.

Conflict of interest

The authors do not declare any conflict of interest.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants.

Chapitre 3 – Conclusion et perspectives

Conclusion

Ce mémoire aura permis d'explorer l'expérience de la fatigue chez des participants sains. Pour induire un état de fatigue mentale, nous avons utilisé une tâche de Stroop alors que pour induire un état de fatigue physique, nous avons utilisé une tâche de pédalage à puissance fixe. Dans les deux cas, la tâche était d'une durée de 60 minutes, divisée en trois blocs de 20 minutes. Les participants se sont également soumis à une batterie de tests de performance, avant et après chaque condition fatigante, pour mesurer les effets de la fatigue sur les performances physiques et cognitives. Lors des deux sessions en laboratoire, nous avons recueilli de nombreuses données que ce soit le sentiment de fatigue et d'ennui, la perception de l'effort, la charge de travail subjective, les affects, la performance ou encore les fréquences cardiaque et respiratoire. Ces données nous ont apporté un certain nombre d'informations quant à notre réussite à induire de la fatigue ou non.

Bien que nous n'ayons pas réussi à induire de la fatigue par un effort physique et/ou mental chez certains participants, il est intéressant de remarquer une certaine divergence entre les mesures quantitatives c'est-à-dire les mesures prises pendant la visite (autant subjectives qu'objectives), et les mesures qualitatives c'est-à-dire l'expérience rapportée par le participant en entrevue. Comme nous avons pu l'observer dans notre étude, les participants ont exprimé, lors de leur entrevue, certaines expériences qui n'étaient pas forcément en accord avec les données rapportées et mesurées pendant la session. Par exemple, lorsqu'un participant a mentionné lors de son entrevue qu'une session était plus ennuyante que l'autre, mais que d'autres données telles que les échelles visuelles analogiques et/ou les affects suggéraient le contraire.

Lorsque nous utilisons la définition opérationnelle de la fatigue induite par un effort mental (i.e, augmentation du sentiment de fatigue et/ou diminution des performances cognitives) (Boksem

et Tops, 2008), trois des quatre participants ont été fatigués par notre protocole. Autant les données objectives que subjectives en attestent. Par ailleurs, lorsque nous utilisons la définition opérationnelle de la fatigue induite par un effort physique (i.e., diminution de la force maximale ou de la capacité de production de puissance) (Gandevia, 2001), nos résultats démontrent que seule la femme non active a été fatiguée par notre protocole. En effet, elle est la seule à avoir eu une baisse de performance lors du sprint isocinétique de 6 secondes. Là où nos résultats sont encore plus intéressants et viennent ajouter à la littérature, c'est lorsque nous nous intéressons aux données de la femme active. Bien qu'elle ait amélioré sa performance au sprint isocinétique de 6 secondes (ce qui signifie que nous n'avons pas réussi à induire la fatigue de façon objective), ses données subjectives démontrent au contraire qu'elle a été fatiguée. Autant sa perception de l'effort que son sentiment de fatigue ont augmenté avec le temps. Elle s'est même exprimée en ce sens lors de son entrevue individuelle.

Cela démontre parfaitement la contradiction qui peut résulter de la définition de la fatigue et de ses données objectives et subjectives utilisées pour la quantifier. La fatigue induite par l'effort physique est-elle uniquement une question de diminution de la performance ou faut-il inclure les sensations subjectives dans sa définition ? Cette même question ne se pose pas pour la fatigue induite par un effort mental puisque sa définition inclut autant la composante de performance que celle de sensation (i.e., une augmentation de la sensation de fatigue et une diminution de la performance cognitive) (Boksem et Tops, 2008).

Les participants ont également manifesté avoir ressenti beaucoup d'ennui, que ce soit en présence ou en absence de fatigue. Cela nous a amenés à nous questionner si cela pouvait affecter leur sentiment de fatigue. Bien qu'il ne soit pas possible de déterminer si l'ennui a généré le sentiment de fatigue, ou l'inverse, il semble effectivement y avoir un lien entre ces deux variables. C'est notamment ce qu'ont démontré Mangin et al. (2021) dans une étude récente s'intéressant aux effets de la déplétion de l'ego.

Les chercheurs ont souvent tendance à vouloir dissocier des construits pour mieux les étudier, mais est-ce que cette dissociation est bien comprise et intégrée par le participant? Dans notre

étude, nous pouvons nous interroger à savoir si les participants ont réellement pu dissocier leur ennui de leur fatigue pour les évaluer séparément. Ce résultat soulève un nouveau questionnement : en tant que chercheurs, mesurons-nous vraiment ce que nous pensons ou voulons mesurer ?

La pandémie de COVID-19 nous aura tout de même obligés à apporter des changements majeurs à notre étude. Initialement, nous comptions recruter douze participants alors que ceux-ci auraient dû venir au laboratoire à quatre reprises. Le nombre de participants aurait probablement permis d'atteindre une saturation des données qualitatives alors que l'ajout d'une quatrième visite aurait permis la passation d'un test d'effort maximal permettant la mesure de la $VO_2\text{max}$ et de la puissance aérobie maximale.

Perspectives

À la vue des données présentées dans ce mémoire, il serait intéressant d'élargir nos connaissances sur la fatigue subjective lors d'un exercice physique. Premièrement, les résultats de la femme active suggèrent qu'il pourrait exister une divergence entre les données subjectives et objectives en lien avec la fatigue. De cette façon, il serait intéressant de continuer à explorer l'interaction entre ces deux dimensions et voir s'il est possible d'induire de la fatigue subjective sans diminuer les capacités de production de force/puissance maximale. Par ailleurs, puisqu'un lien semble exister entre la fatigue et l'ennui, il serait intéressant d'explorer l'interaction entre la fatigue subjective et l'ennui lors d'un exercice physique d'endurance. Dans cette perspective, notre protocole pourrait être ajusté afin de pallier certaines limites. Lors de la première visite, les participants passeront un test incrémental pour déterminer leur puissance aérobie maximale et se familiariseront avec la batterie de tests. Lors de la deuxième visite, les participants subiront la condition de fatigue et passeront la batterie de tests de performance avant et après celle-ci. Pour induire de la fatigue, nous suggérons qu'un pourcentage de la puissance aérobie maximale soit utilisé et maintenu jusqu'à épuisement. Maintenir la puissance jusqu'à épuisement plutôt que

pour une durée constante, devrait permettre d'assurer la présence de fatigue subjective (la variable d'intérêt). Il serait également intéressant de voir s'il existe un effet de la fatigue subjective sur les performances cognitives et physiques subséquentes ainsi que sur la perception de l'effort.

Combiner la présente recherche à de futures recherches sur la fatigue subjective permettra de mieux comprendre la fatigue dans sa globalité et de mieux la redéfinir.

Références bibliographiques

- Ackerman, P. L. et Kanfer, R. (2009, Jun). Test length and cognitive fatigue: an empirical examination of effects on performance and test-taker reactions. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 15(2), 163-181. <https://doi.org/10.1037/a0015719>
- Aitken, B. et MacMahon, C. (2019). Shared Demands Between Cognitive and Physical Tasks May Drive Negative Effects of Fatigue: A Focused Review. *Frontiers in Sports and Active Living*, 1. <https://doi.org/10.3389/fspor.2019.00045>
- Allen, D. G., Lamb, G. D. et Westerblad, H. (2008, Jan). Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiological Reviews*, 88(1), 287-332. <https://doi.org/10.1152/physrev.00015.2007>
- Amann, M. et Dempsey, J. A. (2008, Jan 1). Locomotor muscle fatigue modifies central motor drive in healthy humans and imposes a limitation to exercise performance. *Journal of Physiology*, 586(1), 161-173. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.141838>
- Ament, W. et Verkerke, G. J. (2009). Exercise and Fatigue. *Sports Medicine*, 39(5), 389-422. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939050-00005>
- Astorino, T. A., Cottrell, T., Lozano, A. T., Aburto-Pratt, K. et Duhon, J. (2012). Effect of caffeine on RPE and perceptions of pain, arousal, and pleasure/displeasure during a cycling time trial in endurance trained and active men. *Physiology and Behavior*, 106(2), 211-217.
- Aune, T. K., Ingvaldsen, K. P. et Ettema, G. J. C. (2008). Effect of physical fatigue on motor control at different skill levels. *Perceptual and Motor Skills*, (106), 371-386.
- Bergevin, M., Steele, J., de la Garanderie, M. P., Feral-Basin, C., Marcora, S. M., Rainville, P., Caron, J. G. et Pageaux, B. (2021). <https://doi.org/10.1101/2021.12.23.474027>
- Bieleke, M., Barton, L. et Wolff, W. (2021, Aug). Trajectories of boredom in self-control demanding tasks. *Cognition & Emotion*, 35(5), 1018-1028. <https://doi.org/10.1080/02699931.2021.1901656>
- Boksem, M. A., Meijman, T. F. et Lorist, M. M. (2005, Sep). Effects of mental fatigue on attention: an ERP study. *Brain Research: Cognitive Brain Research*, 25(1), 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.04.011>

- Boksem, M. A., Meijman, T. F. et Lorist, M. M. (2006, May). Mental fatigue, motivation and action monitoring. *Biological Psychology*, 72(2), 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.08.007>
- Boksem, M. A. et Tops, M. (2008, Nov). Mental fatigue: costs and benefits. *Brain Research Reviews*, 59(1), 125-139. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2008.07.001>
- Borg, E. et Kaijser, L. (2006, Feb). A comparison between three rating scales for perceived exertion and two different work tests. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 16(1), 57-69. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2005.00448.x>
- Braun, V., Clarke, V. et Weate, P. (2016). Using thematic analysis in sport and exercise research. *Routledge handbook of qualitative research in sport and exercise*, 191-205.
- Brehm, J. W. et Self, E. A. (1989). The intensity of motivation. *Annual Review of Psychology*, 40, 109-131. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.40.020189.000545>
- Brisswalter, J., Collardeau, M. et René, A. (2002). Effects of Acute Physical Exercise Characteristics on Cognitive Performance. *Sports Medicine*, 32(9), 555-566.
- Brown, D. M. Y. et Bray, S. R. (2017, Dec 1). Effects of Mental Fatigue on Physical Endurance Performance and Muscle Activation Are Attenuated by Monetary Incentives. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 39(6), 385-396. <https://doi.org/10.1123/jsep.2017-0187>
- Brown, D. M. Y., Graham, J. D., Innes, K. I., Harris, S., Flemington, A. et Bray, S. R. (2020, Mar). 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>
- Brownsberger, J., Edwards, A., Crowther, R. et Cottrell, D. (2013, Dec). Impact of mental fatigue on self-paced exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 34(12), 1029-1036. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1343402>
- Burnley, M. et Jones, A. M. (2018, Feb). Power-duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *Eur J Sport Sci*, 18(1), 1-12. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1249524>
- Cairns, S. P., Knicker, A. J., Thompson, M. W. et Spøgaard, G. (2005). Evaluation of models used to study neuromuscular fatigue. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 33(1), 9-16.

- Cantelon, J. A. et Giles, G. E. (2021). A Review of Cognitive Changes During Acute Aerobic Exercise. *Frontiers in Psychology*, 12, 653158. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.653158>
- Caron, J. G., Schaefer, L., André-Morin, D. et Wilkinson, S. (2017). A Narrative Inquiry into a Female Athlete's Experiences with Protracted Concussion Symptoms. *Journal of Loss and Trauma*, 22(6), 501-513. <https://doi.org/10.1080/15325024.2017.1335150>
- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D. et Cohen, J. D. (1998). Anterior Cingulate Cortex, Error Detection, and the Online Monitoring of Performance. *Science*, 280(5364), 747-749. <https://doi.org/doi:10.1126/science.280.5364.747>
- Chang, Y. K., Labban, J. D., Gapin, J. I. et Etnier, J. L. (2012, May 9). The effects of acute exercise on cognitive performance: a meta-analysis. *Brain Research*, 1453, 87-101. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2012.02.068>
- Coetzee, S. K. et Klopper, H. C. (2010, Jun). Compassion fatigue within nursing practice: a concept analysis. *Nursing & Health Sciences*, 12(2), 235-243. <https://doi.org/10.1111/j.1442-2018.2010.00526.x>
- Coulacoglou, C. et Saklofske, D. H. (2017). Executive Function, Theory of Mind, and Adaptive Behavior. Dans *Psychometrics and Psychological Assessment* (p. 91-130). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802219-1.00005-5>
- Davranche, K., Brisswalter, J. et Radel, R. (2015). Where are the limits of the effects of exercise intensity on cognitive control? *Journal of Sport and Health Science*, 4(1), 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.08.004>
- Davranche, K. et McMorris, T. (2009, Apr). Specific effects of acute moderate exercise on cognitive control. *Brain and Cognition*, 69(3), 565-570. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.12.001>
- de Morree, H. et Marcora, S. (2015, 09/01). Psychobiology of Perceived Effort During Physical Tasks. 255-270. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1236-0_17
- de Morree, H. M., Klein, C. et Marcora, S. M. (2012, Sep). Perception of effort reflects central motor command during movement execution. *Psychophysiology*, 49(9), 1242-1253. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2012.01399.x>

- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Duncan, M. J., Fowler, N., George, O., Joyce, S. et Hankey, J. (2015). Mental fatigue negatively influences manual dexterity and anticipation timing but not repeated high-intensity exercise performance in trained adults. *Research in Sports Medicine*, 23(1), 1-13. <https://doi.org/10.1080/15438627.2014.975811>
- Eastwood, J. D., Frischen, A., Fenske, M. J. et Smilek, D. (2012). The Unengaged Mind: Defining Boredom in Terms of Attention. *Perspectives on Psychological Science*, 7(5), 482-495. <https://doi.org/10.1177/1745691612456044>
- Ekkekakis, P., Parfitt, G. et Petruzzello, S. J. (2011, Aug 1). The pleasure and displeasure people feel when they exercise at different intensities: decennial update and progress towards a tripartite rationale for exercise intensity prescription. *Sports Medicine*, 41(8), 641-671. <https://doi.org/10.2165/11590680-000000000-00000>
- Enoka, R. M. et Duchateau, J. (2008, Jan 1). Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *Journal of Physiology*, 586(1), 11-23. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.139477>
- Enoka, R. M. et Duchateau, J. (2016, Nov). Translating Fatigue to Human Performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(11), 2228-2238. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000929>
- Enoka, R. M. et Stuart, D. G. (1992, May). Neurobiology of muscle fatigue. *J Appl Physiol* (1985), 72(5), 1631-1648. <https://doi.org/10.1152/jappl.1992.72.5.1631>
- Etnier, J. L., Salazar, W., Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Han, M. et Nowell, P. (1997, 01 Sep. 1997). The Influence of Physical Fitness and Exercise upon Cognitive Functioning: A Meta-Analysis. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 19(3), 249-277. <https://doi.org/10.1123/jsep.19.3.249>
- Fatigue. Dans *Oxford Dictionary*. Oxford. <https://www.lexico.com/definition/fatigue>
- Gandevia, S. C. (2001, Oct). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological Reviews*, 81(4), 1725-1789. <https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.4.1725>

- George, J. D., Stone, W. J. et Burkett, L. N. (1997, Mar). Non-exercise VO₂max estimation for physically active college students. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(3), 415-423. <https://doi.org/10.1097/00005768-199703000-00019>
- Grego, F., Vallier, J. M., Collardeau, M., Bermon, S., Ferrari, P., Candito, M., Bayer, P., Magnie, M. N. et Brisswalter, J. (2004, Jul 1). Effects of long duration exercise on cognitive function, blood glucose, and counterregulatory hormones in male cyclists. *Neuroscience Letters*, 364(2), 76-80. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2004.03.085>
- Hardy, C. J. et Rejeski, W., J. (1989). Not What, But How One Feels: The Measurement of Affect During Exercise. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 11(3), 304-317.
- Hart, S. G. et Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. Dans *Advances in psychology* (vol. 52, p. 139-183). Elsevier.
- Head, J., Tenan, M. S., Tweedell, A. J., LaFiandra, M. E., Morelli, F., Wilson, K. M., Ortega, S. V. et Helton, W. S. (2017). Prior Mental Fatigue Impairs Marksmanship Decision Performance. *Frontiers in Physiology*, 8, 680. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00680>
- Holding, D. (1983). Fatigue. Dans G. R. J. Hockey (dir.), *Stress and fatigue in human performance* (p. 145-164). John Wiley and Sons, Durnham.
- Hopker, J. G., O'Grady, C. et Pageaux, B. (2017, Apr). Prolonged constant load cycling exercise is associated with reduced gross efficiency and increased muscle oxygen uptake. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 27(4), 408-417. <https://doi.org/10.1111/sms.12673>
- Hopstaken, J. F., van der Linden, D., Bakker, A. B. et Kompier, M. A. (2015, Mar). A multifaceted investigation of the link between mental fatigue and task disengagement. *Psychophysiology*, 52(3), 305-315. <https://doi.org/10.1111/psyp.12339>
- Inzlicht, M., Shenhav, A. et Olivola, C. Y. (2018, Apr). The Effort Paradox: Effort Is Both Costly and Valued. *Trends Cogn Sci*, 22(4), 337-349. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.01.007>
- Jacquet, T., Lepers, R., Poulin-Charronnat, B., Bard, P., Pfister, P. et Pageaux, B. (2021, Jan 8). Mental fatigue induced by prolonged motor imagery increases perception of effort and

- the activity of motor areas. *Neuropsychologia*, 150, 107701. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107701>
- Kluger, B. M., Herlofson, K., Chou, K. L., Lou, J. S., Goetz, C. G., Lang, A. E., Weintraub, D. et Friedman, J. (2016, May). Parkinson's disease-related fatigue: A case definition and recommendations for clinical research. *Movement Disorders*, 31(5), 625-631. <https://doi.org/10.1002/mds.26511>
- Kluger, B. M., Krupp, L. B. et Enoka, R. M. (2013). Fatigue and fatigability in neurologic illnesses: proposal for a unified taxonomy. *Neurology*, 80(4), 409-416.
- Lal, S., Jarus, T. et Suto, M. J. (2012). A Scoping Review of the Photovoice Method: Implications for Occupational Therapy Research. *Canadian Journal of Occupational Therapy*, 79(3), 181-190. <https://doi.org/10.2182/cjot.2012.79.3.8>
- Lambourne, K. et Tomporowski, P. (2010, Jun 23). The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: a meta-regression analysis. *Brain Research*, 1341, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.03.091>
- Le Mansec, Y., Pageaux, B., Nordez, A., Dorel, S. et Jubeau, M. (2018, Dec). Mental fatigue alters the speed and the accuracy of the ball in table tennis. *Journal of Sports Sciences*, 36(23), 2751-2759. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1418647>
- Lepers, R., Maffiuletti, N. A., Rochette, L., Brugniaux, J. et Millet, G. Y. (2001). Neuromuscular fatigue during a long-duration cycling exercise. *Journal of Applied Physiology*, 92, 1487-1493.
- Lorist, M. M. (2008, Sep 26). Impact of top-down control during mental fatigue. *Brain Research*, 1232, 113-123. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.07.053>
- Lorist, M. M., Boksem, M. A. et Ridderinkhof, K. R. (2005, Jul). Impaired cognitive control and reduced cingulate activity during mental fatigue. *Brain Research: Cognitive Brain Research*, 24(2), 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.01.018>
- Lorist, M. M., Klein, M., Nieuwenhuis, S., De Jong, R., Mulder, G. et Meijman, T. F. (2000). Mental fatigue and task control: Planning and preparation. *Psychophysiology*, 37, 614-625.

- MacMahon, C., Schucker, L., Hagemann, N. et Strauss, B. (2014, Aug). Cognitive fatigue effects on physical performance during running. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 36(4), 375-381. <https://doi.org/10.1123/jsep.2013-0249>
- Mangin, T., André, N., Benraiss, A., Pageaux, B. et Audiffren, M. (2021). No ego-depletion effect without a good control task. *Psychology of Sport and Exercise*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2021.102033>
- Marcora, S. (2009, Jun). Perception of effort during exercise is independent of afferent feedback from skeletal muscles, heart, and lungs. *J Appl Physiol (1985)*, 106(6), 2060-2062. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.90378.2008>
- Marcora, S. (2010a, Feb). Counterpoint: Afferent feedback from fatigued locomotor muscles is not an important determinant of endurance exercise performance. *J Appl Physiol (1985)*, 108(2), 454-456; discussion 456-457. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00976.2009a>
- Marcora, S. (2010b). Effort: perception of.
- Marcora, S. (2019). Psychobiology of fatigue during endurance exercise. Dans *Endurance Performance in Sport* (p. 15-34). <https://doi.org/10.4324/9781315167312-2>
- Marcora, S., Bosio, A. et de Morree, H. M. (2008, Mar). Locomotor muscle fatigue increases cardiorespiratory responses and reduces performance during intense cycling exercise independently from metabolic stress. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 294(3), R874-883. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00678.2007>
- Marcora, S. et Staiano, W. (2010, Jul). The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle? *European Journal of Applied Physiology*, 109(4), 763-770. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1418-6>
- Marcora, S., Staiano, W. et Manning, V. (2009, Mar). Mental fatigue impairs physical performance in humans. *J Appl Physiol (1985)*, 106(3), 857-864. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.91324.2008>
- Martarelli, C., Berthouzoz, P., Bieleke, M. et Wolff, W. (2022). Bored of sports? On the interactive role of engagement and value as predictors of boredom in athletic training. <https://doi.org/https://doi.org/10.31234/osf.io/43rqw>

- Martin, K., Thompson, K. G., Keegan, R., Ball, N. et Rattray, B. (2015, Apr). Mental fatigue does not affect maximal anaerobic exercise performance. *European Journal of Applied Physiology*, 115(4), 715-725. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-3052-1>
- Mathiowetz, V., Volland, G., Kashman, N. et Weber, K. (1985). Adult norms for the Box and Block Test of manual dexterity. *American Journal of Occupational Therapy*, 39(6), 386-391. <https://doi.org/https://doi.org/10.5014/ajot.39.6.386>
- McMorris, T., Sproule, J., Turner, A. et Hale, B. J. (2011, Mar 1). Acute, intermediate intensity exercise, and speed and accuracy in working memory tasks: a meta-analytical comparison of effects. *Physiology and Behavior*, 102(3-4), 421-428. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2010.12.007>
- Meijman, T. F. (2000). The theory of the STOP-emotion: On the functionality of fatigue. Dans D. Pogorski et W. Karwowski (dir.), *Ergonomics and safety for global business quality and production* (p. 45-47). CENT INST LABOUR PROTECT.
- Millet, G. Y. (2010). Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur la fatigue... sans jamais oser le demander. *Movement & Sport Sciences*, 70(2), 1-3. <https://doi.org/10.3917/sm.070.0001>
- Millet, G. Y. et Lepers, R. (2004). Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercises. *Sports Medicine*, 34(2), 105-116. <https://doi.org/10.2165/00007256-200434020-00004>
- Milyavskaya, M., Inzlicht, M., Johnson, T. et Larson, M. J. (2019). Reward sensitivity following boredom and cognitive effort: A high-powered neurophysiological investigation. *Neuropsychologia*, 123, 159-168.
- Missenard, O., Mottet, D. et Perrey, S. (2009, Jul 7). Adaptation of motor behavior to preserve task success in the presence of muscle fatigue. *Neuroscience*, 161(3), 773-786. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.03.062>
- Moore, R. D., Romine, M. W., O'Connor P, J. et Tomporowski, P. D. (2012, May). The influence of exercise-induced fatigue on cognitive function. *Journal of Sports Sciences*, 30(9), 841-850. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.675083>
- Mosso, A. (1906). *Fatigue*. Swan Sonnenschein & Co. Ltd.

- Muller, T. et Apps, M. A. J. (2019, Feb 4). 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>
- Noble, B. J. et Robertson, R. J. (1996). *Perceived Exertion*. Human Kinetics.
- Pageaux, B. (2016, Nov). Perception of effort in Exercise Science: Definition, measurement and perspectives. *Eur J Sport Sci*, 16(8), 885-894. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1188992>
- Pageaux, B., Clos, P., Impellizzeri, F., Audiffren, M., Stapley, P., Grémeaux, V., Perrey, S., O'Connor, P. J., Marcora, S. M., Lepers, R. et Laroche, D. (2020). Towards Standardized Instructions For Measuring Perception Of Effort And Muscle Pain During Physical Exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 52(7S), 499-499. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000679556.09727.4b>
- Pageaux, B. et Lepers, R. (2016). Fatigue Induced by Physical and Mental Exertion Increases Perception of Effort and Impairs Subsequent Endurance Performance. *Frontiers in Physiology*, 7, 587. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00587>
- Pageaux, B. et Lepers, R. (2018). The effects of mental fatigue on sport-related performance. *Progress in Brain Research*, 240, 291-315. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2018.10.004>
- Pageaux, B., Lepers, R., Dietz, K. C. et Marcora, S. M. (2014, May). Response inhibition impairs subsequent self-paced endurance performance. *European Journal of Applied Physiology*, 114(5), 1095-1105. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-2838-5>
- Pageaux, B., Marcora, S. M. et Lepers, R. (2013, Dec). Prolonged mental exertion does not alter neuromuscular function of the knee extensors. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(12), 2254-2264. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31829b504a>
- Pageaux, B., Marcora, S. M., Rozand, V. et Lepers, R. (2015). Mental fatigue induced by prolonged self-regulation does not exacerbate central fatigue during subsequent whole-body endurance exercise. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 67. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00067>
- Pageaux, B., Theurel, J. et Lepers, R. (2017, Nov 1). Cycling Versus Uphill Walking: Impact on Locomotor Muscle Fatigue and Running Exercise. *International Journal of Sports*

- Physiology and Performance*, 12(10), 1310-1318. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0564>
- Pattyn, N., Van Cutsem, J., Dessy, E. et Mairesse, O. (2018). Bridging Exercise Science, Cognitive Psychology, and Medical Practice: Is "Cognitive Fatigue" a Remake of "The Emperor's New Clothes"? *Frontiers in Psychology*, 9, 1246. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01246>
- Payen de la Garanderie, M., Courtay, A., Féral-Basin, C., Rainville, P., Gaveau, J. et Pageaux, B. <https://doi.org/10.31236/osf.io/2ehtb>
- 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>
- Phillips, S. (2015). *Fatigue in Sport and Exercise*. Routledge. <https://books.google.ca/books?id=AUQIoAEACAAJ>
- Pontifex, M. B., McGowan, A. L., Chandler, M. C., Gwizdala, K. L., Parks, A. C., Fenn, K. et Kamijo, K. (2019). A primer on investigating the after effects of acute bouts of physical activity on cognition. *Psychology of Sport and Exercise*, 40, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2018.08.015>
- Preston, J. et Wegner, D. M. (2009). Elbow grease: When action feels like work. *Oxford handbook of human action*, 569-586.
- Richter, M., Gendolla, G. H. E. et Wright, R. A. (2016). Three Decades of Research on Motivational Intensity Theory. Dans (p. 149-186). <https://doi.org/10.1016/bs.adms.2016.02.001>
- Robertson, R. J. et Noble, B. J. (1997). Perception of physical exertion: methods, mediators, and applications. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 25, 407-452.
- Rozand, V., Lebon, F., Papaxanthis, C. et Lepers, R. (2015, Jun 25). Effect of mental fatigue on speed-accuracy trade-off. *Neuroscience*, 297, 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2015.03.066>
- Smirmaul Bde, P. (2012, Apr). Sense of effort and other unpleasant sensations during exercise: clarifying concepts and mechanisms. *Br J Sports Med*, 46(5), 308-311. <https://doi.org/10.1136/bjism.2010.071407>

- Smith, M. R., Marcora, S. M. et Coutts, A. J. (2015, Aug). Mental Fatigue Impairs Intermittent Running Performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(8), 1682-1690. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000592>
- Smith, M. R., Zeuwts, L., Lenoir, M., Hens, N., De Jong, L. M. et Coutts, A. J. (2016, Jul). Mental fatigue impairs soccer-specific decision-making skill. *Journal of Sports Sciences*, 34(14), 1297-1304. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1156241>
- St Clair Gibson, A., Lambert, E. V., Rauch, L. H., Tucker, R., Baden, D. A., Foster, C. et Noakes, T. D. (2006). The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort. *Sports Medicine*, 36(8), 705-722. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636080-00006>
- Staiano, W., Bosio, A., de Morree, H. M., Rampinini, E. et Marcora, S. (2018). The cardinal exercise stopper: Muscle fatigue, muscle pain or perception of effort? *Progress in Brain Research*, 240, 175-200. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2018.09.012>
- Stroop, J. R. (1992). Studies of interference in serial verbal reactions (Reprinted from J. Exp. Psychol. 18, 643–662, 1935). *Journal of Experimental Psychology: General*, 121(1), 15-23. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.121.1.15>
- Svebak, S. et Murgatroyd, S. (1987). Metamotivational dominance: A multi-method validation of reversal theory constructs. *Journal of Personality and Social Psychology*, 48, 107-116.
- Tanaka, H., Monahan, K. D. et Seals, D. R. (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, 37(1), 153-156. [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(00\)01054-8](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(00)01054-8)
- Tanaka, M. et Watanabe, Y. (2012). Supraspinal regulation of physical fatigue. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 36(1), 727-734.
- Taylor, J. L., Amann, M., Duchateau, J., Meeusen, R. et Rice, C. L. (2016, Nov). Neural Contributions to Muscle Fatigue: From the Brain to the Muscle and Back Again. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(11), 2294-2306. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000923>
- Thomson, K., Watt, A. et Liukkonen, J. (2009). Differences in ball sports athletes speed discrimination skills before and after exercise induced fatigue. *Journal of Sports Science & Medicine*, (8), 259-264.

- Tiesinga, L. J., Dassen, T. W. et Halfens, R. J. (1996). Fatigue: a summary of the definitions, dimensions, and indicators. *Nursing diagnosis : ND : the official journal of the North American Nursing Diagnosis Association,,* 7(2), 51-62. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1744-618x.1996.tb00293.x>
- Tomporowski, P. (2003). Effects of acute bouts of exercise on cognition. *Acta Psychologica*, 112, 297-324.
- Tomporowski, P. et Ellis, N. (1986). Effects of Exercise on Cognitive Processes: A Review. *Psychological Bulletin*, 99(3), 338-346.
- Trecroci, A., Boccolini, G., Duca, M., Formenti, D. et Alberti, G. (2020). Mental fatigue impairs physical activity, technical and decision-making performance during small-sided games. *PLoS One*, 15(9), e0238461. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238461>
- Trivel, D., Calmels, P., Léger, L., Busso, T., Devillard, X., Castells, J. et Denis, C. (2004). Validity and Reliability of the Huet Questionnaire to Assess Maximal Oxygen Uptake. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 29(5), 623-638. <https://doi.org/10.1139/h04-040> %M 15509875
- Van Cutsem, J., Marcora, S., De Pauw, K., Bailey, S., Meeusen, R. et Roelands, B. (2017, Aug). 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. et Eling, P. (2006, Sep). Mental fatigue disturbs local processing more than global processing. *Psychological Research*, 70(5), 395-402. <https://doi.org/10.1007/s00426-005-0228-7>
- van der Linden, D., Frese, M. et Meijman, T. F. (2003). Mental fatigue and the control of cognitive processes: effects on perseveration and planning. *Acta Psychologica*, 113(1), 45-65. [https://doi.org/10.1016/s0001-6918\(02\)00150-6](https://doi.org/10.1016/s0001-6918(02)00150-6)
- Wang, C., Trongnetrpunya, A., Samuel, I. B., Ding, M. et Kluger, B. M. (2016, Apr 6). Compensatory Neural Activity in Response to Cognitive Fatigue. *Journal of Neuroscience*, 36(14), 3919-3924. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3652-15.2016>
- Westgate, E. C. et Wilson, T. D. (2018, Oct). Boring thoughts and bored minds: The MAC model of boredom and cognitive engagement. *Psychological Review*, 125(5), 689-713. <https://doi.org/10.1037/rev0000097>

Wolff, W. et Martarelli, C. S. (2020, Sep). Bored Into Depletion? Toward a Tentative Integration of Perceived Self-Control Exertion and Boredom as Guiding Signals for Goal-Directed Behavior. *Perspectives on Psychological Science*, 15(5), 1272-1283.
<https://doi.org/10.1177/1745691620921394>

Wright, R. A. (2008). Refining the prediction of effort: Brehm's distinction between potential motivation and motivation intensity. *Social and Personality Psychology Compass*, 2(2), 682-701.

Annexes

Appendix A

Endurance-Trained Male's Performance Tests Data

	Physical exertion session		Mental exertion session	
	Pre	Post	Pre	Post
Cognitive performance tests				
<i>n-back (n-1)</i>				
Accuracy (%)	93.33	86.67	91.00	93.00
Response time (ms)	427.88 ±	405.48 ±	393.50 ±	393.34 ±
	21.58	65.01	38.69	77.48
PE	20.66	20	11.66	13.33
<i>n-back (n-2)</i>				
Accuracy (%)	68.75	81.25	87.50	79.00
Response time (ms)	676.54 ±	532.12 ±	470.51 ±	506.76 ±
	31.53	34.29	51.69	79.99
PE	25.66	21	16.66	16.66
Physical performance tests				
<i>Handgrip max force (N)</i>	548.517	562.650	560.600	571.867
<i>Box and Block Test</i>				
PE at 0.75 Hz	10	10	10	10
PE at 1 Hz	10	10	13	13
<i>Cycling exercise</i>				
PE at 75W	10	15	10	20
PE at 125 W	22.5	21.5	11.5	20

Note. ms: milliseconds; N: Newton; Hz: Hertz; PE: Perception of effort; W: Watts

Appendix B

Table B1

Active Male's Performance Tests Data

		Physical exertion session		Mental exertion session	
		Pre	Post	Pre	Post
Cognitive	performance				
	tests				
	<i>n-back (n-1)</i>				
	Accuracy (%)	93.33	86.67	91.07	93.33
	Response time (ms)	423.61 ±	436.12 ±	518.00 ±	439.80 ±
		21.19	26.65	58.01	39.73
	PE	19	13.66	40	18
	<i>n-back (n-2)</i>				
	Accuracy (%)	87.50	83.31	85.38	87.50
	Response time (ms)	425.01 ±	434.31 ±	554.67 ±	422.86 ±
		30.97	25.08	16.08	27.42
	PE	23.66	21.66	65	28.33
Physical performance tests					
	<i>Handgrip max force (N)</i>	290.742	350.417	311.808	288.167
	<i>Box and Block Test</i>				
	PE at 0.75 Hz	12	11	18	8
	PE at 1 Hz	14	13	23	10
	<i>Cycling exercise</i>				
	PE at 75 W	14	14	15.5	7
	PE at 125 W	19.5	15.5	29	17

Note. ms: milliseconds; N: Newton; Hz: Hertz; PE: Perception of effort; W: Watts

Figure B2

Active Male's PhotoVoice for (Panel A) Mental Exertion Session and (Panel B) Physical Exertion Session

Pour raison de droit des images, les photos ont été transmises aux évaluateurs, mais ne peuvent pas être présentement ajoutées sur cette page.

Appendix C

Active Female's Performance Tests Data

	Physical exertion session		Mental exertion session	
	Pre	Post	Pre	Post
Cognitive performance tests				
<i>n-back (n-1)</i>				
Accuracy (%)	86.67	93.33	100	100
Response time (ms)	413.29 ±	379.80 ±	353.00 ±	415.45 ±
PE	54.34	14.78	48.77	23.79
<i>n-back (n-2)</i>				
Accuracy (%)	89.56	95.81	93.75	100
Response time (ms)	516.04 ±	510.50 ±	483.34 ±	511.23 ±
PE	56.05	24.97	15.60	37.06
PE	12.66	13	19.33	20.66
Physical performance tests				
<i>Handgrip max force (N)</i>	280.792	284.083	287.983	270.017
<i>Box and Block Test</i>				
PE at 0.75 Hz	5	3	6	3
PE at 1 Hz	6	9	10	5
<i>Cycling exercise</i>				
PE at 75W	21	15	20	29
PE at 125W	25.5	25	26.5	35

Note. ms: milliseconds; N: Newton; Hz: Hertz; PE: Perception of effort; W: Watts

Appendix D

Non-Active Female's Performance Tests Data

		Physical exertion session		Mental exertion session	
		Pre	Post	Pre	Post
Cognitive	performance				
	tests				
	<i>n-back (n-1)</i>				
	Accuracy (%)	97.73	95.53	97.73	100
	Response time (ms)	379.38 ±	396.62 ±	412.09 ±	407.64 ±
		21.69	31.49	35.10	20.90
	PE	15	15	18	20.66
	<i>n-back (n-2)</i>				
	Accuracy (%)	100	97.88	93.75	97.88
	Response time (ms)	385.48 ±	368.17 ± 4.18	442.52 ±	443.58 ±
		41.62		54.63	65.50
	PE	18	18	23	21.33
Physical performance tests					
	<i>Handgrip max force (N)</i>	209.772	224.445	172.176	210.738
	<i>Box and Block Test</i>				
	PE at 0.75 Hz	10	15	15	15
	PE at 1 Hz	13	20	15	15
	<i>Cycling exercise</i>				
	PE at 75W	26.5	45	28	35
	PE at 125 W	57.5	75	47.5	57.5

Note. ms: milliseconds; N: Newton; Hz: Hertz; PE: Perception of effort; W: Watts

Appendix E

Interview guide

Reminder and explanation of the interview process

- Before we begin, I'd like to mention a few things to you:
 - There are no right or wrong answers. Answer as best as you can based on how you felt during the two lab visits
 - As mentioned in the consent form you signed during the first visit, the interview will be recorded, is this still fine with you?
 - The information provided will be confidential
 - An anonymization code will be used when transcribing the interview.
- Are you ready to begin the interview? Do you have any questions before we begin?
- During the interview, I will be taking notes, but I will actively listen to everything you say. This will ensure that I don't interrupt you or miss any important information.

Interview Questions

- In your words, how would you describe fatigue?
- You have participated in two visits to our laboratory. On your first visit, you completed 60 minutes of [a computer exercise]. On your second visit, you completed 60 minutes of [stationary bike exercise].
 - If you considered these exercises fatiguing, how do you explain the difference in your experience of fatigue?
- [PhotoVoice] I invited you to take (or retrieve) photos/pictures that illustrate different states of fatigue experienced during your visits. I would like you to explain what each photo represents in relation to fatigue and your lab visits.
- [Recordings visit 1 and 2] During the fatiguing exercises, you were filmed. I will show you video segments from your visits. These are 60 sec segments from each block for a total of

3 min (20 sec at the beginning of the block, 20 sec in the middle and 20 sec at the end of the block).

- I would like you to tell me about how you felt during this visit and how you feel when you see these images.
- [Perception of effort values] Now that you have seen the clips from this visit, I will show you the different values of perception of effort reported during these video clips. What do the increases/decreases values mean to you? How do the changes in these values represent your experience?
- How are the experiences of fatigue in the lab and the sensations generated similar to other experiences you have had in your daily life (e.g., school, job, sports, physical activity)?

Conclusion

- I have asked all the questions necessary to learn more about your perspective based on your experience. Is there anything else that you consider important that you would like to talk about?