

Université de Montréal

**Utiliser la perception de l'effort pour prescrire  
l'exercice au cours de tâches motrices des membres  
supérieurs**

Par  
Marie Payen de la Garanderie

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

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

Dépôt initial : Juin 2021

© Payen de la Garanderie Marie, 2021

Université de Montréal

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

Ce mémoire intitulé :

**Utiliser la perception de l'effort pour prescrire  
l'exercice au cours de tâches motrices des membres  
supérieurs**

Présenté par :

Marie Payen de la Garanderie

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Julie Messier, Ph. D., présidente-rapporteuse

Benjamin Pageaux, Ph. D., directeur de recherche

Mathieu Andrieux, Ph. D., membre du jury

## Résumé

**Objectif :** La perception de l'effort (PE) est utilisée dans la prescription et la supervision d'exercice lors de tâches locomotrices et de résistance. Néanmoins, son utilisation pour prescrire et superviser l'exercice lors de tâches motrices des membres supérieurs reste incertaine. Cette étude vise à tester ces possibilités.

**Méthodes :** Quarante participants se sont portés volontaires. Dans l'expérience 1, quatre intensités de PE ont été utilisées pour prescrire l'exercice dans une version modifiée du Test du Box and Block (TBB) et d'une tâche de pointage. La possibilité de superviser l'exercice a été étudiée en imposant trois niveaux de difficultés via un tempo ou un poids et en mesurant les changements de PE associés. L'expérience 2 réplique la possibilité de prescrire l'exercice avec l'intensité de la PE et étudie les effets de l'ajout d'un poids sur l'avant-bras dominant sur la performance et la PE au cours de la version standardisée du TBB. L'activité musculaire, les fréquences cardiaque et respiratoire ont été mesurées.

**Résultats :** Dans l'expérience 1, l'augmentation de l'intensité de la PE pour prescrire l'exercice a induit une augmentation de la performance et l'augmentation de la difficulté des tâches a augmenté la PE du participant. Dans l'expérience 2, la possibilité d'utiliser la PE pour prescrire l'intensité de l'exercice a été répliquée. La réalisation du TBB avec un poids additionnel révèle un maintien de la performance au prix d'une PE plus élevée. Dans les deux expériences, l'activité musculaire constitue le meilleur corrélât physiologique de la PE.

**Conclusion :** Nos résultats suggèrent que la PE est un outil efficace pour prescrire et superviser l'exercice au cours de tâches motrices des membres supérieurs.

**Mots-clés :** effort perçu, tâches manuelles, échelle CR100, psychophysiologie, Test du Box and Block, tâche de pointage.

# Abstract

**Purpose:** While the perception of effort (PE) is widely used to prescribe and monitor exercise during locomotor and resistance tasks, its use to prescribe and monitor exercise during upper-limb motor tasks remains unclear. This study aimed to test these possibilities.

**Methods:** Forty participants volunteered in two experiments. In experiment 1, by using a modified version of the box and block test (BBT) and a pointing task, four PE intensities were used to prescribe the exercise. The possibility of monitoring the exercise was investigated during these tests by monitoring changes in the rating of PE in response to three task difficulties manipulated with different movement tempo and weights added on the exercising forearm. Experiment 2 replicated the possibility of prescribing the exercise with the PE intensity during the BBT and explored the impact of adding weight on the exercising forearm on performance and PE during the standardized version of the BBT. Muscle activation, heart rate and respiratory frequencies were recorded.

**Results:** In experiment 1, increasing the PE intensity to prescribe the exercise induced an increased performance between each intensity. Increasing task difficulty with higher movement tempo and adding weight on the forearm increased the rating of PE. Experiment 2 replicated the possibility to use PE intensity for exercise prescription during the BBT. When completing the BBT with an additional weight on the forearm, performance was maintained at a cost of a higher PE. In both experiments, muscle activation was the best physiological marker of PE.

**Conclusion:** Our results suggest that PE is an efficient tool to prescribe and monitor exercise during upper-limb motor tasks.

**Keywords:** perceived exertion, manual task, CR100 scale, motor control, psychophysiology, Box and Block Test, Pointing Task.

# Table des matières

<i>Résumé</i> .....	3
<i>Abstract</i> .....	4
<i>Table des matières</i> .....	5
<i>Tableaux et figures</i> .....	7
<i>Introduction</i> .....	8
<i>I. Cadre théorique</i> .....	12
1. <i>Définitions de la perception de l'effort</i> .....	12
2. <i>Neurophysiologie de la perception de l'effort</i> .....	18
A. Le modèle des afférences musculaires.....	18
B. Le modèle de la décharge corollaire.....	22
C. Le modèle combiné.....	26
3. <i>La mesure de la perception de l'effort</i> .....	27
A. Utilisation d'échelles psychophysiques et questionnaires.....	28
B. Corrélats physiologiques de l'effort.....	35
4. <i>Performance et perception de l'effort</i> .....	39
A. Régulation de la performance d'endurance.....	39
B. Régulation de la performance motrice.....	42
C. Régulation de la performance lors de tâches motrices des membres supérieurs et perception de l'effort.....	43
5. <i>But de l'étude</i> .....	44
<i>II. Étude</i> .....	47
<i>Abstract</i> .....	48
<i>Materials and methods</i> .....	51
1. <i>Participants</i> .....	51
2. <i>Upper limb motor tasks</i> .....	52
a. <i>Box and Block test</i> .....	52
b. <i>Pointing task</i> .....	53
3. <i>Overview of the two experiments</i> .....	54
a. <i>Experiment 1</i> .....	54

b. Experiment 2.....	56
5. Physiological measurements .....	59
Statistical Analysis.....	60
1. Experiment 1 .....	62
a. Using the perception of effort to prescribe the exercise.....	62
b. Manipulating the tempo to alter task difficulty.....	67
c. Adding weight on the forearm to alter task difficulty.....	71
2. Experiment 2 .....	76
a. Using the perception of effort to prescribe the exercise.....	76
b. Effects of adding weight on the forearm when completing the Box and Block test with the standardized instructions. ....	77
<b>III. Conclusion et perspectives.....</b>	<b>88</b>
A. Conclusion.....	88
B. Perspectives : manipulation de la demande mentale .....	89
<b>IV. References.....</b>	<b>91</b>

## Tableaux et figures

<i>Table 1. Évolution des définitions de l'effort à travers le temps.....</i>	<i>16</i>
<i>Table 2. Description of the participants.....</i>	<i>51</i>

<i>Figure 1. Évolution de la définition de la perception de l'effort en fonction du construit utilisé.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 2. Illustration des modèles neurophysiologiques proposés pour expliquer l'origine de la perception de l'effort.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 3. Illustration du modèle de la décharge corollaire. Extraite de De Morree et Marcora (2015) Psychobiology of Perceived Effort during Physical Tasks.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 4. Extraite de (de Morree et al., 2014).....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 5. Échelles Omnibus.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 6. Échelles de Borg, extraites de Borg (2006)......</i>	<i>30</i>
<i>Figure 7. Échelle CR100, extraite de Borg (1994).....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 8. Illustration du modèle psychobiologique de la performance d'endurance....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 9. The Box and Block Test and a Pointing Task.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 10. Overview of the experiments.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 11. Experiment 1: using the perception of effort to prescribe the exercise during the Box and Block test.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 12. Experiment 1: using the perception of effort to prescribe the exercise during the Pointing task.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure 13. Experiment 1: Manipulating the tempo to alter task difficulty during the Box and block test.....</i>	<i>70</i>
<i>Figure 14. Experiment 1: Manipulating the tempo to alter task difficulty during the Pointing task.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure 15. Experiment 1: Adding weight on the forearm to alter task difficulty during the Box and Block test.....</i>	<i>74</i>
<i>Figure 16. Experiment 1: Adding weight on the forearm to alter task difficulty during the Pointing Task.....</i>	<i>75</i>
<i>Figure 17. Experiment 2: using the perception of effort to prescribe the exercise during the Box and Block test.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure 18. Experiment 2: Adding weight on the forearm to alter task difficulty during the Box and Block test with its validated instructions.....</i>	<i>79</i>

# Introduction

Faire la vaisselle, lire un livre, soulever un poids... Ces tâches du quotidien requièrent de l'effort. L'effort correspond à l'intensité de l'engagement dans une tâche afin de la réaliser (Marcora, 2010b; Preston, 2009). Ainsi, l'effort mobilisé varie en quantité et en intensité. La sensation consciente de la difficulté et de l'intensité d'une tâche physique ou cognitive est connue sous le nom de perception de l'effort (Pageaux, 2016).

Depuis les premières études dans les années 60 (Borg, 1962 ; 1987 ; 1998), la perception de l'effort a connu un intérêt croissant en sciences du sport et en psychologie. Ainsi, la perception de l'effort : 1) est liée à l'intensité de l'exercice et à la quantité de ressources investies (Richter, 2016) ; 2) joue un rôle crucial dans la régulation de nos comportements (Demanet et al., 2013) ; 3) est exacerbée par la fatigue physique (de Morree et al., 2012), cognitive (Pageaux et al., 2015) et certaines pathologies comme la paralysie cérébrale (Fragala-Pinkham et al., 2015), l'obésité infantile (Thivel, 2016) ou l'insuffisance cardiaque (Pina, 2003) ; 4) est identifiée comme une barrière majeure à l'adhérence à l'activité physique (Marcora, 2015; Steinhardt & Dishman, 1989). Élargir les connaissances sur la perception de l'effort est un enjeu de taille étant donné sa pertinence dans un contexte clinique, de recherche et de santé publique.

Pour ce faire, il est possible de mesurer la perception de l'effort à l'aide d'échelles psychophysiques (Borg, 1998). Ce moyen a permis de mettre en évidence le rôle majeur de la perception de l'effort dans la performance sportive (Marcora, 2008a; Pageaux & Lepers, 2016, 2018). La perception de l'effort est ainsi identifiée comme un facteur limitant de la performance d'endurance : la sensation consciente de la difficulté de l'exercice mène au désengagement de celui-ci (Pageaux et al., 2013). D'autre part, l'impact négatif de la fatigue physique et cognitive augmente la perception de l'effort (Enoka, 1992 ; Pageaux, 2016 et 2018), ce qui diminue l'intensité de l'engagement dans la tâche et influence en conséquence la performance sportive (de Morree & Marcora, 2015; Pageaux & Lepers, 2018). Néanmoins, l'effort et la fatigue sont des perceptions distinctes et l'effort peut être perçu dans le cadre d'exercices qui n'induisent pas de fatigue (de Morree & Marcora, 2010, 2012). En ce sens, il est crucial de dissocier les mesures de fatigue et d'effort.



D'autre part, la perception de l'effort permet la prescription d'activité physique aussi bien dans un contexte clinique que de performance (Robertson & Noble, 1997). En effet, la perception de l'effort est liée à l'intensité de l'exercice et aux corrélats physiologiques associés (p. ex. concentrations en lactate sanguin, activité musculaire, consommation maximale d'oxygène, de Morree et al., 2012; de Morree & Marcora, 2010; Scherr et al., 2013). Elle rend également compte des réponses perceptuelles à l'exercice, ces mêmes réponses qui permettent l'autorégulation des ressources mobilisées dans une tâche (Preston, 2009). Ainsi, mesurer la perception de l'effort donne accès aux dimensions psychophysiologiques de l'exercice et constitue un outil de choix en réhabilitation (Pina et al., 2003).

Cela se vérifie dans plusieurs contextes, dont la réhabilitation à la suite d'un accident vasculaire cérébral (De Doncker et al., 2020), dans le cadre de paralysie cérébrale (Fragala-Pinkham et al., 2015), de lésion de la moelle épinière (Au et al., 2017) et également auprès des aînés. Ainsi, Hess et collaborateurs (2016) mettent en évidence le lien entre vieillissement et l'augmentation de la perception de l'effort : les aînés mobilisent une plus grande quantité d'effort que des individus jeunes pour réaliser une même tâche. L'augmentation de la perception de l'effort tend à diminuer la motivation des aînés à s'engager dans différentes activités. Or l'implication régulière dans des activités, notamment physiques et cognitives, est cruciale afin de réduire le déclin des capacités associé au vieillissement et maintenir une bonne santé cognitive (Hertzog et al., 2008). La perception de l'effort, particulièrement en ce qui concerne les aînés, est donc un prédicteur essentiel de l'engagement et de la prise de décision (Pageaux, 2014; Preston, 2009). En ce sens, les programmes d'intervention devraient déployer des outils qui permettent d'évaluer la perception de l'effort. Cela permettrait de favoriser l'adhérence des aînés à des programmes d'activité physique et d'entraînement cognitif, et également maximiser leur participation à des activités régulières.

A l'heure actuelle, les recherches sur la perception de l'effort en sciences du sport portent principalement sur différents types de performance : des tâches de force mettant en jeu les membres supérieurs (Bray et al., 2012) et inférieurs (Pageaux et al., 2016) ; des tâches d'endurance qui mettent en jeu le corps entier (Marcora, 2009; Nicolò et al., 2016;

Pageaux et al., 2014), les membres inférieurs (Pageaux et al., 2016) et supérieurs (Bouffard et al., 2018; Yang et al., 2019). Cependant, bien que de récentes études ont proposé un rôle clé de la perception de l'effort dans la régulation du contrôle moteur et de tâches mettant en jeu les membres supérieurs (Cos, 2017a; Shadmehr et al., 2016), peu d'études se sont intéressées à mesurer cette perception lors de ces tâches. Au meilleur de nos connaissances, aucune étude ne s'est spécifiquement intéressée à explorer la relation entre cette perception et la difficulté de l'exercice en absence de fatigue. C'est dans ce contexte que nous nous sommes particulièrement intéressés aux tâches motrices des membres supérieurs puisqu'elles sont omniprésentes au quotidien (travail de bureau, tâches ménagères...).

Ce mémoire présente mon projet de maîtrise, réalisé au cours des années 2019 à 2021. Initialement, le projet devait regrouper deux études explorant le domaine physique et cognitif de l'effort : la manipulation de la demande physique (étude 1) et mentale (étude 2). Le but était de tester la possibilité d'utiliser l'échelle CR100 pour mesurer la perception de l'effort au cours de tâches motrices impliquant les membres supérieurs. La crise sanitaire de la COVID-19 ayant repoussé l'étude 2 à l'été 2021, nous avons dû composer avec ces changements. En conséquence, mon mémoire se concentre extensivement sur l'étude 1 manipulant la demande physique de tâches motrices des membres supérieurs et l'impact sur la perception de l'effort. Cette étude est composée de deux expériences complémentaires qui seront présentées sous forme d'article.

Les objectifs de cette étude sont i) de tester la possibilité d'utiliser la perception de l'effort pour prescrire l'exercice et la performance et ii) de reporter la perception de l'effort lorsque la difficulté physique est manipulée au cours de tâches motrices impliquant les membres supérieurs. Le protocole de l'étude 2 sera également présenté dans ce mémoire.

Dans le cadre théorique qui suit, nous parlerons de l'évolution de la définition de la perception de l'effort et des enjeux associés à ces changements. Nous détaillerons ensuite les processus de mesure de la perception de l'effort ainsi que les modèles neurophysiologiques proposés pour expliquer l'origine de la perception de l'effort. Nous discuterons ensuite le rôle central de la perception de l'effort dans la performance sportive grâce au modèle psychobiologique (de Morree & Marcora, 2015) et à la théorie de

l'intensité de la motivation (Brehm & Self, 1989). Finalement, nous parlerons de la régulation de la performance dans les tâches des membres supérieurs et nous présenterons les tests utilisés dans notre étude.

# I. Cadre théorique

## 1. Définitions de la perception de l'effort

Une perception réfère à l'expérience consciente d'une sensation, qui résulte de l'intégration et du traitement d'un ou plusieurs signaux sensoriels par le cerveau (interprétation du cerveau, Gardner et Martin, 2000). Puisqu'elle varie d'un individu à un autre, une perception est subjective (Weiten, 2010).

Le Larousse définit l'effort comme la « mobilisation volontaire de forces physiques, intellectuelles, morales en vue de résister ou pour vaincre une résistance ». Cette définition met en évidence le caractère difficile et aversif de l'effort, ainsi que sa présence dans les domaines physiques et cognitifs (Inzlicht, 2018). La perception de l'effort correspond donc à l'intensité de l'engagement dans une tâche. Ainsi, il n'est pas possible de percevoir un effort lorsque l'on est passif (non-engagé) (de Morree, 2015 ; Pageaux, 2016). En ce sens, la perception de l'effort est un outil de régulation du comportement humain (Demanet et al., 2013) : elle permet d'estimer la quantité de ressources à investir selon l'appréciation subjective de la difficulté d'une tâche. C'est ce ratio coûts/bénéfices qui détermine l'engagement dans une tâche (Basten et al., 2010).

Comme illustré dans le tableau 1, il existe plusieurs définitions de l'effort. Dès la fin du XIXème siècle, l'effort suscite l'intérêt des psychologues et des philosophes. William James (1880) propose "I maintain that the feeling of muscular energy put forth is a complex afferent sensation coming from the tense muscles, the strained ligaments, squeezed joints, fixed chest, closed glottis, contracted brow, clenched jaws, etc." (James & History, 1880). Autrement dit, ce sont les sensations de tension issues des structures périphériques qui indiquent une résistance et donc la présence d'effort. A l'époque de James, le moyen de relayer ces informations de la périphérie au niveau central était inconnu. Au regard des théories actuelles proposées pour expliquer les mécanismes neurophysiologiques de la perception de l'effort, la vision de James illustre la théorie des afférences musculaires, qui sera détaillée dans la partie suivante.

Il ajoute également que la sensation motrice serait proportionnelle à la force de l'impulsion du mouvement qui part de l'organe central innervant les nerfs moteurs. On peut assumer que « la force de l'impulsion du mouvement » réfère à l'influx nerveux, au potentiel d'action, et que « l'organe central » réfère au système nerveux central. Contrairement à la première assertion, ce dernier point semble en faveur d'une origine centrale de l'effort et supporterait la théorie de la décharge corollaire. Ainsi, le débat concernant l'origine sensorielle de l'effort est ancien et repose sur les mêmes construits théoriques que ceux proposés actuellement. Avec James, il n'y a pas d'opposition entre l'origine périphérique et l'origine centrale : l'une et l'autre sont co-occurentes.

En 1897, John Dewey caractérise l'effort comme une sensation de tension et de mouvement dans une certaine direction. Cette sensation serait étroitement liée à divers changements physiques et physiologiques, notamment une modification du schéma respiratoire (hyperventilation et/ou dyspnée) et de posture (épaules hautes). Dewey identifie également le froncement de sourcils comme l'expression faciale de l'effort, faisant écho aux travaux de De Morree et Marcora (2010). En effet, la contraction du muscle corrugateur du sourcils (*corrugator supercilii*, de Morree & Marcora, 2010, 2012) est corrélée à l'augmentation de la difficulté de la tâche et de la perception de l'effort.

Dewey semble être le premier à faire état d'une conscience (latin *conscientia*, de *scire*, savoir ; Larousse) de l'effort, c'est-à-dire d'une représentation mentale de l'expérience en cours. La résistance, le sentiment de tension expérimenté par le sujet au cours d'une tâche serait à l'origine de la conscientisation de l'effort. C'est cette expérience consciente qui fait le lien entre l'activité corporelle et la psyché.

Plus encore, Dewey spécifie l'origine de l'effort. Celui-ci résulterait d'une incompatibilité entre deux images sensorielles : l'habitude et la nouveauté. « Il y aurait effort, d'après M. Dewey, toutes les fois que nous faisons servir des habitudes acquises à l'apprentissage d'un exercice nouveau. (...) L'effort ne ferait que manifester cette lutte, cette interférence de deux habitudes distinctes et pourtant semblables. » (Bergson, *L'Effort intellectuel*, juin 1902, p. 18). En d'autres termes, l'habitude acquise est mise au service de l'habitude nouvelle. L'effort serait le cheminement de l'une vers l'autre, une tentative de

coordonner différents apprentissages pour les unifier vers un nouveau résultat. Réaliser une nouvelle coordination demande de briser l'ancienne et cela se produit dans la résistance et le conflit, d'où le caractère aversif de l'effort. La lutte des habitudes anciennes contre les nouvelles manifeste l'effort (Bergson, 1902). Ce processus demande du temps puisque le manque d'unité dans les actions ralentit l'exécution. Une tâche qui requiert un effort prend donc plus de temps à réaliser qu'une tâche qui n'en requiert pas.

En sciences du sport, le concept de perception de l'effort émerge dans les années 60 avec Gunnar Borg qui le caractérise avec une définition et une description. La perception de l'effort est définie comme la sensation de la difficulté, d'intensité et de labeur d'un exercice physique (« the feeling of how heavy, strenuous and laborious exercise is », Borg, 1962). Borg accompagne sa définition en décrivant la perception de l'effort comme la sensation des organes de la circulation et de la respiration, des muscles, des articulations et de la force (« *the sensation from the organs of circulation and respiration, from the muscles, the skin, the joints and force* » Borg, 1962).

Cette description et cette définition ont donné lieu à deux courants qui caractérisent différentes évolutions de la perception de l'effort. Les périphéristes se réfèrent à la description de Borg tandis que les centralistes se réfèrent à la définition de Borg pour étudier la perception de l'effort. Cette dissociation est majeure car, selon l'approche adoptée, les signaux sensoriels désignés pour expliquer l'origine de la perception de l'effort sont différents.

Les périphéristes, en s'inspirant de la description de Borg, ont introduit d'autres sensations pour décrire la perception de l'effort. Dans ce courant théorique, la perception de l'effort est ainsi considérée comme l'intégration de différentes sensations, et non pas comme une sensation unique et isolée. La description initiale discute la perception de l'effort comme multifactorielle, issue de plusieurs retours sensoriels. En ce sens, Noble et Robertson (1996) ajoutent les notions d'inconfort et de fatigue à la description de Borg (« the subjective intensity of effort, strain, discomfort and/or fatigue that is experienced during physical exercise », Robertson & Noble, 1997; Utter, 2007). Ici, la perception de l'effort est discutée comme un ensemble de sensations. Ce mélange de sensations peut être assimilé

à une *gestalt*, c'est-à-dire un « Fait, pour une entité perceptive, d'être traitée par le sujet comme un tout plutôt que comme une juxtaposition de parties » (© Larousse). Or il a été démontré que l'homme est capable de dissocier la perception de l'effort des autres sensations liées à l'exercice telles que la douleur (O'Connor & Cook, 2001), l'inconfort (Christian et al., 2014), la perception de force (Jones, 1995; Jones & Hunter, 1983) et la fatigue objective (de Morree & Marcora, 2010). Bien que la perception de l'effort soit exacerbée par la fatigue physique (de Morree et al., 2012) et mentale (Jacquet et al., 2021), elles sont toutefois des perceptions distinctes et différenciables. Ainsi, la définition de Noble et Robertson ne semble pas appropriée à la perception de l'effort qui peut être mesurée et reportée par des individus indépendamment des autres sensations liées à l'exercice. Plus encore, chacune des sensations citées ci-dessus possèdent des mécanismes neurophysiologiques à part entière (Marcora, 2009).

Enfin, inclure d'autres sensations que celle d'effort peut nuire à la validité et à la qualité des mesures expérimentales. Il est donc nécessaire d'exclure les facteurs confondants dans sa définition, c'est-à-dire la ou les variables qui peuvent influencer la variable d'intérêt et l'interprétation des résultats (Pageaux, 2016).

Dans ce mémoire, nous prendrons pour référence l'approche centraliste illustrée par la définition de Marcora (2009) : la perception de l'effort réfère à la **sensation consciente de la difficulté et de l'intensité d'une tâche** (« the conscious sensation of the difficulty and the intensity of a task »). Cette définition est la plus fidèle aux descripteurs verbaux des échelles psychophysiques de Borg (*Borg's RPE scales*, décrites dans la section suivante) et conçoit la perception de l'effort comme une sensation unique, distincte des autres sensations liées à l'effort. Ce critère est essentiel dans un souci de rigueur méthodologique et de validité de la mesure.

**Table 1. Évolution des définitions de l'effort à travers le temps**

<b>Auteurs</b>	<b>Anglais</b>	<b>Traduction française</b>
James, 1880	<p>“I maintain that the feeling of muscular energy put forth is a complex afferent sensation coming from the tense muscles, the strained ligaments, squeezed joints, fixed chest, closed glottis, contracted brow, clenched jaws, etc.”</p> <p>“The strength of the motor sensation is purely proportional to the strength of the impulse to movement, which starts from the central organ innervating motor nerves.”</p>	<p>“La sensation d'énergie musculaire dans la mise en action est une sensation afférente complexe provenant des tensions musculaires et ligamentaires, des articulations serrées, de la poitrine fixe, de la glotte fermée, du front contracté, des mâchoires serrées, etc.</p> <p>"La force de la sensation motrice est purement proportionnelle à la force de l'impulsion au mouvement, qui part de l'organe central innervant les nerfs moteurs".</p>
Dewey, 1897	<p>“It is the rivalry, with the accompanying disagreeable tone due to failure of habit, that constitutes the sense of effort.”</p>	<p>« C'est la rivalité, avec le caractère désagréable qui l'accompagne en raison d'un manque d'habitude, qui constitue le sens de l'effort »</p>
Bergson, 1902	-	<p>« Qui dit effort dit ralentissement et retard. Le même travail occupe plus ou moins de temps, - toutes autres conditions égales, - selon qu'il exige ou n'exige pas un effort. »</p>
Borg, 1962	<p>“the feeling of how heavy, strenuous and laborious exercise is”</p>	<p>La sensation de la difficulté, du caractère fatiguant et laborieux d'un exercice physique</p>
Borg, 1962	<p>“the sensation from the organs of circulation and respiration, from the muscles, the skin, the joints and force”</p>	<p>La sensation qui provient des organes de la circulation et respiratoires, des muscles, des articulations et des forces appliquées à ces derniers</p>
Noble et Robertson, 1996	<p>"the subjective intensity of effort, strain, discomfort and/or fatigue that is experienced during physical exercise"</p>	<p>L'intensité subjective de l'effort, de résistance, d'inconfort et/ou de fatigue expérimenté au cours d'un exercice physique.</p>
Marcora, 2009	<p>“the conscious sensation of the difficulty and the intensity of a task”</p>	<p>La sensation consciente de la difficulté et de l'intensité d'une tâche</p>
Preston et Wegner, 2009	<p>“The experience of effort is the particular feeling of that energy being exerted, or the phenomenal experience of effort. (...) Exertion is accompanied by a sensation of strain and labor, a feeling that intensifies the harder a person tries”</p>	<p>L'expérience de l'effort est le sentiment particulier de cette énergie qui s'exerce, ou l'expérience phénoménale de l'effort L'effort s'accompagne d'une sensation de tension et de travail, un sentiment qui s'intensifie à mesure que l'on s'efforce</p>
Steele, 2021	<p>“The perception of that which must be done in attempting to meet a particular task demand, or set of task demands, and which is determined by the perception of current task demands relative to the perception of capacity to meet those demands, though cannot exceed that current perception of capacity”</p>	<p>La perception de ce qui doit être fait pour répondre aux besoins d'une tâche particulière ou d'un ensemble de tâches, et qui est déterminée par la perception des besoins actuels de la tâche comparativement à la perception de sa capacité à répondre à ces besoins, bien qu'elle ne puisse pas dépasser la perception actuelle de sa capacité.</p>



"The strength of the motor sensation is purely proportional to the strength of the impulse to movement, which starts from the central organ innervating motor nerves."

"the feeling of how heavy, strenuous and laborious exercise is"

"the conscious sensation of the difficulty and the intensity of a task"

Construit utilisé :  
effort

James,  
1880

Dewey,  
1897

Bergson,  
1902

Borg,  
1962

Noble &  
Robertson,  
1996

Marcora,  
2009

"I maintain that the feeling of muscular energy put forth is a complex afferent sensation coming from the tense muscles, the strained ligaments, squeezed joints, fixed chest, closed glottis, contracted brow, clenched jaws, etc."

"It is the rivalry, with the accompanying disagreeable tone due to failure of habit, that constitutes the sense of effort."

"the sensation from the organs of circulation and respiration, from the muscles, the skin, the joints and force"

"the subjective intensity of effort, strain, discomfort and/or fatigue that is experienced during physical exercise"

Construit utilisé :  
*Gestalt*

**Figure 1. Évolution de la définition de la perception de l'effort en fonction du construit utilisé**

## 2. Neurophysiologie de la perception de l'effort

Il est reconnu que la perception de l'effort résulte de l'intégration centrale de signaux sensoriels (Noble et Robertson, 1996). Ce processus implique différentes aires corticales en amont du cortex moteur primaire dont l'aire motrice pré supplémentaire, l'aire motrice supplémentaire et le cortex cingulaire antérieur (de Morree et al., 2012; de Morree et al., 2014; Williamson et al., 2006; Williamson et al., 2001). Néanmoins la nature du signal sensoriel à l'origine de la perception de l'effort reste débattue. Trois modèles sont proposés et s'appuient sur des construits théoriques différents (Pageaux, 2016).

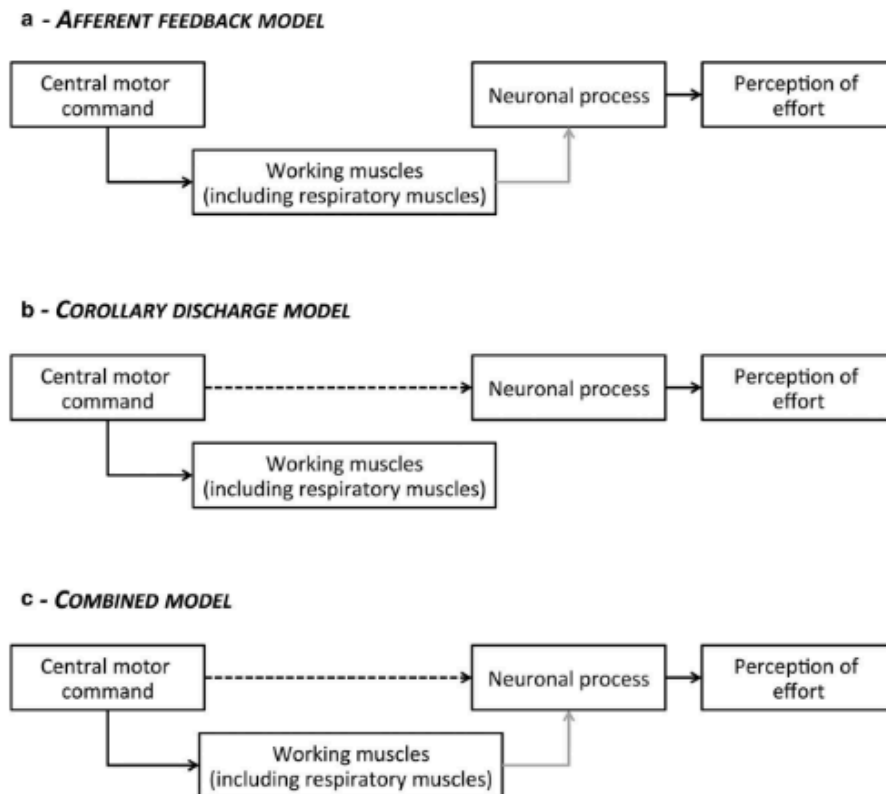
Le modèle des afférences musculaires propose que la perception de l'effort reflète l'intégration centrale des afférences musculaires issues des organes actifs au cours de la tâche (Amann et al., 2011; Broxterman et al., 2018; Broxterman et al., 2017). Le modèle de la décharge corollaire propose quant à lui que la perception de l'effort reflète l'intégration centrale d'une copie de la commande motrice centrale, appelée décharge corollaire (de Morree et al., 2012; Marcora, 2009). Enfin, le modèle combiné suggère que ce sont les afférences musculaires associés à la commande motrice centrale qui seraient à l'origine de la perception de l'effort au niveau central (Amann et al., 2010; Bergstrom et al., 2015).

A ce jour, il n'existe pas de consensus sur la neurophysiologie de la perception de l'effort. Nous détaillons dans cette partie les évidences expérimentales qui supportent chaque modèle et apporterons également des limites lorsque celles-ci ont été mise en avant dans la littérature.

### A. Le modèle des afférences musculaires

Ce modèle, populaire parmi les physiologistes, propose que les afférences musculaires des groupes III et IV, du cœur et des poumons constituent le signal sensoriel à l'origine de la perception de l'effort. À l'exercice, les contractions mécaniques et les stimuli chimiques qui en résulte activent des récepteurs au niveau des terminaisons des fibres nerveuses myélinisées (groupe III) et non-myélinisées (groupe IV) localisées dans les muscles squelettiques (Amann et al., 2011; Amann et al., 2008). L'activation de ces

terminaisons induit une décharge des afférences musculaires qui se propagent, via la corne dorsale de la moelle épinière (Wilson et al., 2002; Wilson & Hand, 1997) et la médiation du noyau du tractus solitaire et de la médulla (Craig, 1995; Craig, 2003), vers plusieurs sites du système nerveux central. Finalement, les afférences musculaires des groupes III-IV constituent des ramifications afférentes des réponses cardiovasculaires et ventilatoires (Forster, 2011).



**Figure 2. Illustration des modèles neurophysiologiques proposés pour expliquer l'origine de la perception de l'effort**

*a) modèle des afférences musculaires, b) modèle de la décharge corollaire et c) modèle combiné. Extraite de (Pageaux, 2016) : Perception of effort in Exercise Science: Definition, measurement and perspectives.*

En d'autres termes, les afférences musculaires des groupes III-IV fournissent au système nerveux central des rétroactions sur le stress métabolique, thermique et mécanique (de Morree & Marcora, 2015). Puisque ces facteurs augmentent au cours d'exercice intense

et prolongé (Kaufman et al., 2002) et de façon concomitante avec la perception de l'effort, les périphéristes proposent une relation de causalité entre les afférences musculaires et la perception de l'effort. De plus, la corrélation entre la perception de l'effort, l'augmentation du lactate sanguin et des concentrations en métabolites dans le milieu musculaire est venue renforcer cette théorie (Noble et Robertson, 1996). Des changements périphériques qui, via les projections centrales des afférences musculaires des groupes III-IV vers divers sites spinaux et supra-spinaux dont le cortex sensoriel (Craig, 2003), induiraient la perception de l'effort.

Une méthode d'investigation du rôle des afférences musculaires est l'injection d'opioïdes au niveau de l'espace épidual lombaire. Cela permet de bloquer les afférences sensorielles sans altérer le mouvement (Amann et al., 2010). Si on se réfère à la théorie périphériste, la suppression des afférences musculaires devrait diminuer voire supprimer la perception de l'effort au cours de l'exercice. Pourtant, plusieurs études expérimentales (Barbosa et al., 2016; Fernandes et al., 1990; Pageaux & Gaveau, 2016) ne reportent pas d'effets du blocage pharmacologiques des afférences musculaires sur la perception de l'effort. À l'inverse, la perception de l'effort est parfois même augmentée (Kjær et al., 1999; Smith et al., 2003). Dans ce cas, l'augmentation de la perception de l'effort est due à la l'augmentation de la commande motrice centrale qui compense la faiblesse musculaire induite par l'épidurale.

Une autre méthode d'investigation du rôle des afférences musculaires dans la génération de la perception de l'effort est l'injection de métabolites (Pollak et al., 2014) au sein du muscle squelettique. En effet, la combinaison de lactate, protons et ATP stimule les afférences musculaires III-IV. Selon le modèle périphériste, on s'attend à ce que l'injection stimule les afférences et induise en conséquence une perception de l'effort. Pourtant, dans cette étude, l'injection la stimulation des afférences musculaires III-IV par injection intramusculaire de métabolites n'a pas généré de perception de l'effort en absence de commande motrice centrale, mais d'autres perceptions comme la douleur ou la fatigue.

Plus encore, les afférences sensorielles des poumons sont incluses dans ce modèle (de Morree & Marcora, 2015). Les afférences des chémorécepteurs et des mécanorécepteurs centraux et périphériques de la paroi thoracique, des poumons et des

voies aériennes participeraient à la production de différentes sensations telles que l'insuffisance ou la difficulté respiratoire (dyspnée) ainsi que les douleurs thoraciques (O'Donnell et al., 2007).

Zhao et al. (2003) ont étudié le rôle des afférences sensorielles dans les réponses perceptuelles à l'exercice chez des sujets sains et des sujets avec une double transplantation pulmonaire. La dénervation pulmonaire présente chez les patients, c'est-à-dire l'absence de retours afférents vers le système nerveux central, n'a pas eu d'impact sur l'estimation de la magnitude de l'effort respiratoire chez les sujets transplantés. Les réponses perceptuelles et ventilatoires étaient équivalentes entre les sujets. Burki et al. (1983) ont obtenu des résultats similaires chez des sujets sains dont les voies aériennes inférieures et supérieures ont été anesthésiées. Ces résultats soulignent la possibilité de percevoir l'intensité de l'effort physique réalisé en l'absence d'afférences sensorielles, ou lorsque celles-ci sont diminuées.

Finalement, un des arguments des périphéristes pour supporter le rôle du cœur dans l'initiation de la perception de l'effort est qu'il existe une corrélation positive entre la fréquence cardiaque et la perception de l'effort (de Morree & Marcora, 2015). Néanmoins, plusieurs études expérimentales montrent que la fréquence cardiaque et la perception de l'effort peuvent être dissociées (Pandolf, 1983; Robertson, 1982). Ainsi, Myers et collaborateurs (1987) ont induit une réduction de la fréquence cardiaque par le blocage pharmacologique des chaînes de calcium et des récepteurs bêta adrénergiques. La perception de l'effort reportée par le sujet est inchangée ou augmentée au cours d'un exercice de cyclisme.

En ce sens, Braith et collaborateurs (1992) observent que des patients avec une transplantation cardiaque reportent des valeurs normales de perception de l'effort au cours d'un test incrémental. La dénervation cardiaque est en effet une conséquence de la transplantation cardiaque, et induit une perte d'informations afférentes provenant de des récepteurs d'étirement dans le cœur. Ces résultats suggèrent que les afférences provenant du myocarde ne génèrent pas la perception de l'effort chez des individus symptomatiques et asymptomatiques. L'utilisation d'échelles de mesure de perception de l'effort est d'ailleurs recommandée par l'*American Heart Association* dans la prescription d'exercice post-transplantation (Pina et al., 2003).

## B. Le modèle de la décharge corollaire

Ce modèle propose que l'origine de la perception de l'effort soit essentiellement centrale, précisément issue de l'intégration de la copie de la commande motrice centrale. Cette copie, appelée décharge corollaire ou copie efférente (Marcora, 2009), est acheminée vers les muscles actifs au cours de la tâche, dont les muscles respiratoires. La décharge corollaire s'apparente à des signaux internes qui proviennent des commandes motrices centrifuges (dont la transmission est continue via des nerfs) et qui influencent la perception (McCloskey, 1981). La commande motrice centrale est une activation cérébrale spécifique générant une décharge ou un schéma de décharges générés dans le système nerveux central, conduisant à l'excitation des motoneurones  $\alpha$ . Cette excitation au niveau spinal descend jusqu'aux muscles et initie la contraction musculaire.

Les décharges corollaires ont des conséquences perceptuelles sur le traitement de l'information sensorielle : en la modifiant, elles permettent de faire la distinction entre les stimuli auto-générés et les stimuli externes (McCloskey, 1981). De plus, les décharges corollaires peuvent initier des sensations de natures diverses, telles que la perception de l'effort.

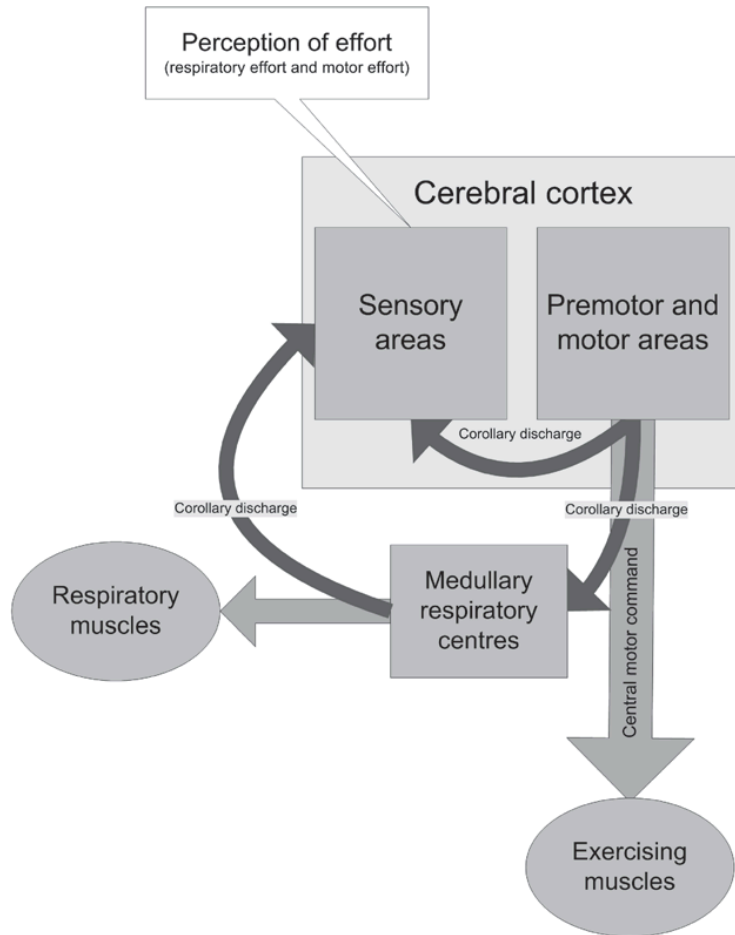
Ce modèle est supporté par l'augmentation de la perception de l'effort lorsqu'il y a nécessité d'augmenter la commande motrice centrale pour réaliser une performance musculaire. D'autre part, la diminution des retours afférents musculaires par anesthésie épidurale n'induit pas une réduction de la perception de l'effort (Pageaux & Gaveau, 2016), renforçant ainsi le modèle de la décharge corollaire. À l'inverse, des conditions dans lesquelles la commande motrice centrale est altérée peuvent entraîner une diminution de la perception de l'effort (McCloskey, 1983). Par exemple, la commande motrice centrale nécessaire à la réalisation d'une tâche augmente en présence de fatigue musculaire (de Morree et al., 2012), engendrant une augmentation de la perception de l'effort (McCloskey et al., 1974). Autrement dit, l'augmentation de la perception de l'effort reflète l'augmentation de la commande motrice centrale envoyée aux muscles locomoteurs et respiratoires. Cette augmentation de la commande a pour but de compenser la diminution progressive de l'excitabilité cortico-spinale, des motoneurones et musculaires induit par la fatigue (Marcora, 2008a). Des effets similaires de compensation de la faiblesse musculaire

par la commande motrice centrale ont été observés lors d'une paralysie partielle par injection d'agent paralysant (D-tubocurarine ou decamethonium) dans l'avant-bras (Gandevia & McCloskey, 1977a, 1977b) et chez des patients hémiparésiques (Gandevia & McCloskey, 1977b).

De même, Marcora et collaborateurs (2008) expérimenté un protocole ayant pour avantage d'induire de la fatigue musculaire sans accumulation de métabolites, c'est-à-dire sans stimuler afférences musculaires III-IV des membres inférieurs. Les auteurs observent une réduction de force musculaire de 18% et une augmentation significative de la perception de l'effort au cours du test de cyclisme à charge constante menée jusqu'à épuisement. Cela s'explique par l'augmentation de la commande motrice centrale en réponse à la diminution de la capacité musculaire, qui induit une augmentation de la perception de l'effort.

D'autre part, au cours de l'exercice aérobie, la sensation d'effort respiratoire contribue en partie à la perception de l'effort globale (cf. partie 2 « Mesure de la perception de l'effort »). Cette sensation est générée en partie par la décharge corollaire de la commande motrice centrale envoyée vers les muscles respiratoires (Grazzini et al., 2005; O'Donnell et al., 2007). Or, comme énoncé précédemment, la sensation d'effort respiratoire est indépendante des retours afférents pulmonaires (Zhao et al., 2003). Finalement l'effort respiratoire et l'effort moteur, c'est-à-dire les muscles actifs au cours de l'exercice, semblent partager des mécanismes neurophysiologiques communs. La décharge corollaire de la commande motrice centrale envoyée aux muscles actifs génère la sensation d'effort moteur tandis que la décharge corollaire de la commande motrice centrale envoyée aux muscles respiratoires génère la sensation d'effort respiratoire (de Morree & Marcora, 2015). Néanmoins, le rôle des afférences musculaires n'est pas exclu dans le modèle de la décharge corollaire, et celles-ci pourraient jouer un rôle indirect via leur implication dans la régulation de la commande motrice centrale (Pageaux, 2016; Pageaux & Gaveau, 2016). En effet, il a été démontré que les afférences des groupe III-IV ont un rôle inhibiteur au niveau spinal et supraspinal (Amann et al., 2020; Gandevia, 2001), contribuant ainsi à la fatigue musculaire et nécessitant une augmentation de la commande motrice centrale pour compenser ces inhibitions et permettre la continuation de l'exercice (Pageaux & Gaveau,

2016). Ainsi, elles ne constituent pas le signal sensoriel à l'origine de la perception de l'effort mais interagissent avec cette perception via leur rôle régulateur de la commande motrice.



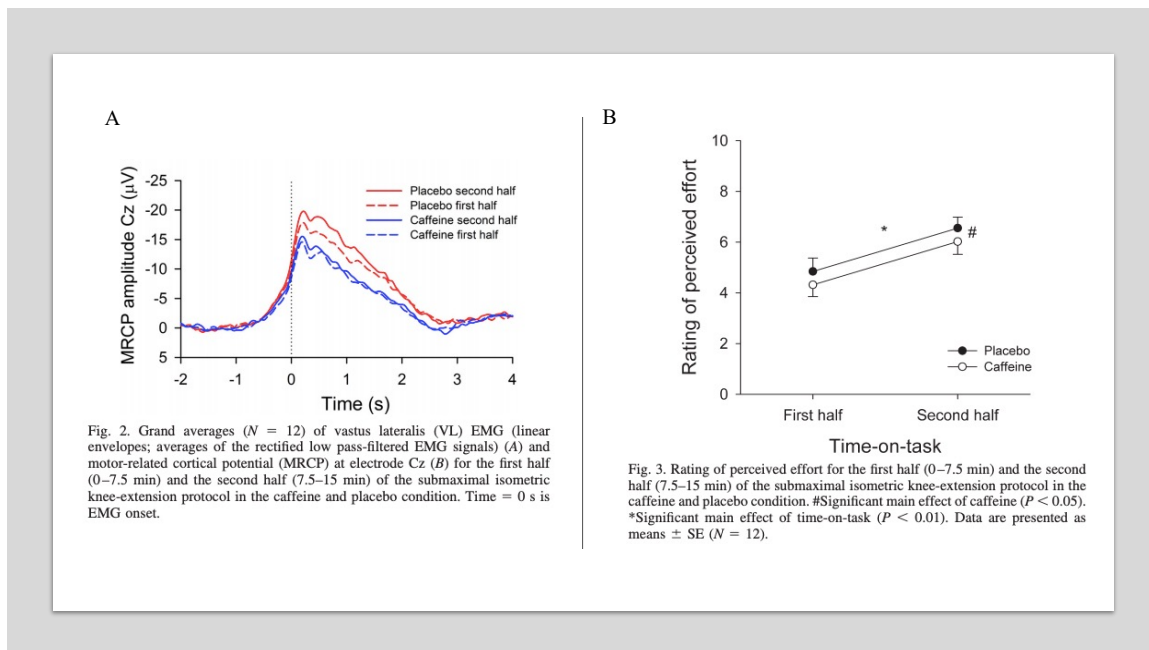
**Figure 3. Illustration du modèle de la décharge corollaire. Extraite de De Morree et Marcora (2015) *Psychobiology of Perceived Effort during Physical Tasks***

Si les aires corticales impliquées dans la perception de l'effort restent à déterminer, des évidences expérimentales proposent que le cortex cingulaire antérieur, le cortex insulaire et le thalamus jouent un rôle dans la perception de l'effort (Apps, 2018; Caruana et al., 2018; Gillies et al., 2019; Parvizi et al., 2013). La stimulation électrique du cortex midcingulaire antérieur induit des changements comportementaux et perceptuels stéréotypés (Parvizi et al., 2013). Les participants reportent un sentiment de challenge, d'inquiétude et d'appréhension en vue d'une épreuve à surmonter. Les auteurs observent également une augmentation du rythme cardiaque, des frémissements de la poitrine et du



cou ainsi que l'anticipation d'un défi associé à une forte motivation de le poursuivre. Talairach et al. (1973) reportent des résultats similaires en stimulant électriquement le cortex cingulaire antérieur jusqu'à sa portion médiane. Là encore des changements autonomes sont observés dont l'augmentation du diamètre de la pupille (mydriase), la rubéfaction du visage, l'augmentation du rythme cardiaque et de la fréquence respiratoire.

Afin d'investiguer la relation entre les aires motrices et pré motrices et la perception de l'effort, De Morree et collaborateurs (2014) proposent de supplémenter des participants en caféine préalablement à la réalisation d'extensions du genou. Les auteurs se basent sur le postulat selon lequel la prise de caféine pré exercice améliore la performance via ses effets ergogènes et une diminution de la perception de l'effort (Davis & Green, 2009; Marcora, 2016). Ils mesurent l'activité cérébrale des aires motrices et pré motrices à partir du potentiel cortical moteur au vertex, identifié comme un marqueur de la commande motrice (Domkin et al., 2002). De ce fait et compte tenu du modèle de la décharge corollaire, les auteurs font l'hypothèse que la diminution de la perception de l'effort devrait être concomitante avec celle du potentiel cortical moteur, représentatif de la commande motrice centrale. Les auteurs observent une diminution de l'amplitude du potentiel cortical lié au mouvement (MRCP) avec l'ingestion de caféine comparativement au groupe placebo (figure 4A). Au cours de l'exercice, l'amplitude du potentiel cortical lié au mouvement augmente au fil du temps. D'autre part, la perception de l'effort augmente dans les deux groupes (figure 4B) mais la perception du groupe caféine reste moindre comparativement au groupe placebo ( $< .05$ ). La mesure du lactate sanguin révèle une légère mais significative augmentation induite par la caféine, suggérant une augmentation des afférences musculaires des groupes III-IV. La possibilité que les afférences musculaires affecte l'amplitude du potentiel cortical n'est pas écartée. Néanmoins, cela ne semble pas impacter directement la perception de l'effort. Finalement, la diminution simultanée de l'activité corticale et de la perception de l'effort associée à la prise de caféine au cours d'un exercice physique soutient la théorie de la décharge corollaire.



**Figure 4. Extraite de (de Morree et al., 2014)**

*Panel A : évolution de l'amplitude du potentiel cortical lié au mouvement mesuré au vertex (Domkin et al.) au cours d'extensions du genou.*

*Panel B : Évolution de la perception de l'effort au cours d'extensions du genou en absence (placebo) ou en présence (caféine) d'ingestion de caféine.*

« *The will to persevere* » semble effectivement associé à une région cérébrale précise, interconnectée avec d'autres structures cérébrales. Les différences dans la structure et le fonctionnement de ce réseau sont associés à des différences innées dans nos capacités à faire face à la détresse physique et/ou psychologique. Bien qu'il n'existe pas de consensus sur la région cérébrale à l'origine de la perception de l'effort, le cortex cingulaire antérieur semble être un candidat de choix.

### C. Le modèle combiné

Comme son nom l'indique, ce modèle postule que la perception de l'effort résulte de l'intégration des afférences et de la décharge corollaire associée à la commande motrice centrale. Amann et collaborateurs (2010) proposent que la commande motrice centrale est déterminante mais que les afférences musculaires périphériques ne sont pas négligeables

dans l'initiation de la perception de l'effort. Les auteurs suggèrent que les afférences musculaires jouent un rôle d'inhibition de la commande motrice centrale afin d'éviter d'atteindre un seuil de fatigue périphérique critique au cours d'exercice d'endurance. Ce mécanisme, qui préserverait l'intégrité de l'organisme, s'opèrerait via la perception de l'effort (Amann et al., 2013). Néanmoins, les évidences expérimentales soutenant ce modèle sont inconsistantes. Les auteurs discutent la perception de l'effort en tant qu'inconfort (Amann et al., 2010). Or l'inconfort caractérise la sensation, ici la perception de l'effort, et renseigne sur son caractère déplaisant (valence affective, Marcora, 2011). Il s'agit donc d'un facteur confondant, qui altère la mesure de la perception de l'effort et ne permet pas de généraliser ces résultats.

Le modèle combiné postule que les afférences musculaires et la décharge corollaire sont tous deux des signaux sensoriels à l'origine de la perception de l'effort. Ainsi, la stimulation de l'un ou de l'autre devrait théoriquement générer une illusion d'effort. Pourtant, il a été démontré que la stimulation des afférences musculaires III et IV via l'injection de métabolites dans le muscle squelettique ne génère pas de perception de l'effort au repos, c'est-à-dire en l'absence de commande motrice centrale (Pageaux, 2016; Pollak et al., 2014).

Enfin, en prenant en compte les limites importantes des modèles des afférences musculaires et combiné, ce mémoire et travail expérimental associé s'inscrit dans le cadre théorique du modèle de la décharge corollaire.

### 3. La mesure de la perception de l'effort

La perception de l'effort reflète la quantité de ressources mobilisées vers une tâche spécifique qui peut être de nature physique (*p.ex.*, courir) ou cognitive (*p.ex.* résoudre un problème mathématique). Mesurer cette perception nous permet donc d'évaluer le niveau d'engagement du sujet dans une tâche donnée (de Morree & Marcora, 2015). Dans cette partie, nous détaillerons les processus de mesure de l'effort subjectif et de l'effort réel (Steele, 2021). La mesure de la perception de l'effort, reportée par le sujet, est réalisée via

des échelles psychophysiques. Cette mesure propre à l'individu est appelée Rating of Perceived Exertion (RPE). La mesure de l'effort réel, c'est-à-dire la quantité de ressources mobilisées par un individu, est réalisée à l'aide des corrélats physiologiques de l'effort.

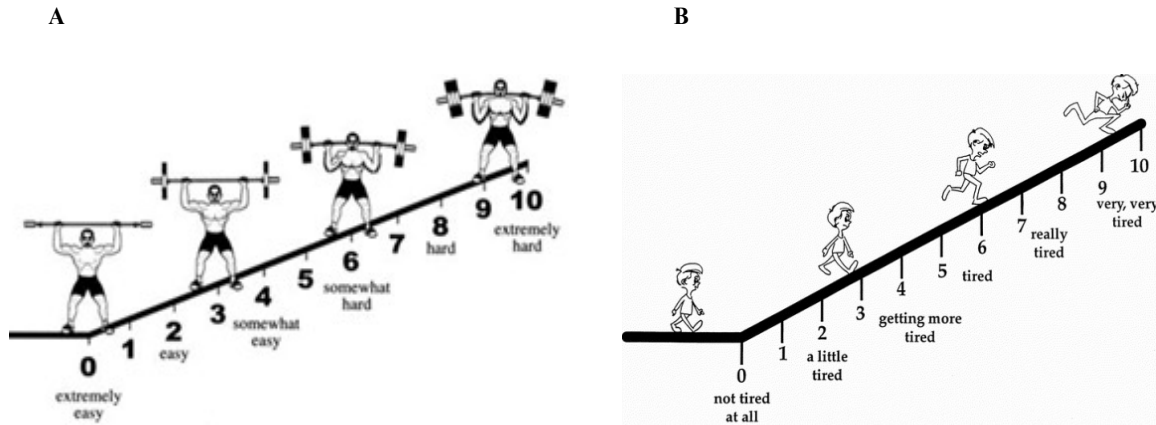
### A. Utilisation d'échelles psychophysiques et questionnaires

Les échelles psychophysiques et les questionnaires sont les outils les plus utilisés pour mesurer la perception de l'effort. Ils présentent l'avantage d'être faciles d'utilisation, de compréhension et sont peu coûteux. Le *National Aeronautics and Space Administration Task Load Index* (NASA TLX, Hart & Staveland, 1988) est un questionnaire qui permet la mesure subjective de la charge de travail. Il est divisé en six sous-échelles qui réfèrent à la demande mentale, à la demande physique, à la demande temporelle, à la performance, à l'effort et à la frustration. Les sujets doivent reporter un score pour chacune de ces dimensions en plaçant une marque sur des échelles contenant des descripteurs bipolaires (p.ex. faible/élevé).

Les échelles OMNI (contraction du terme *omnibus*) sont couramment utilisées pour mesurer la perception de l'effort, à la fois chez des populations saines (Balasekaran et al., 2014; Robertson et al., 2005), symptomatiques (Fragala-Pinkham et al., 2015; Higgins et al., 2013) et chez les enfants (Higgins et al., 2013; Robertson et al., 2000; Utter et al., 2002). Ces échelles ont l'avantage d'être intuitives puisque le gradient d'intensité est représenté par une échelle de 0 (« extrêmement facile ») à 10 (« extrêmement difficile ») accompagnée de pictogrammes. Les pictogrammes sont différents selon le type d'exercice et le public visé. Par exemple, l'échelle OMNI-RES (Robertson et al., 2003) est spécifique à l'exercice en résistance et montre un personnage soulevant un poids. Lorsque l'intensité augmente sur l'échelle, les poids s'ajoutent à la charge soulevée (figure 1, panel A).

L'OMNI-RPE est une échelle qui permet de mesurer la RPE chez les enfants de 6 à 13 ans au cours d'exercice aérobie (figure 1, panel B). Elle a été validée via ses fortes corrélations avec les réponses cardiorespiratoires à l'effort, aussi bien chez les filles (fréquence cardiaque et RPE globale:  $r = .83$ ; consommation d'oxygène et RPE globale :  $r = .88$ ) que chez les garçons (fréquence cardiaque et RPE globale:  $r = .88$ ; consommation d'oxygène et RPE globale :  $r = .93$ , Gammon et al., 2016; Robertson et al., 2005). Par ailleurs, l'échelle Children's Effort Rating Table (CERT) existe également pour monitorer

l'intensité de l'exercice chez les enfants 5 à 9 ans (Coquart et al., 2009; Williams et al., 1994).



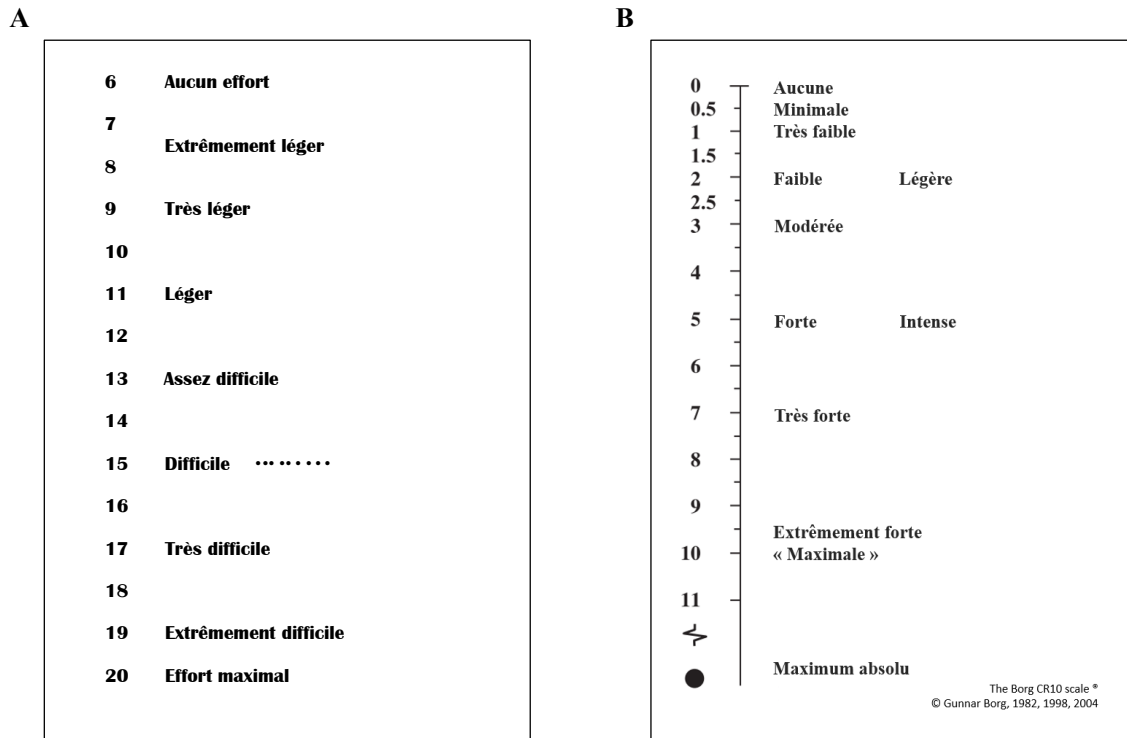
**Figure 5. Échelles Omnibus.**

A. *Échelle OMNI-RES permettant de mesurer la RPE lors d'exercices physiques effectués en résistance. Extraite de Robertson (2003).*

B. *Échelle Children OMNI-RPE permettant de mesurer la RPE chez les enfants (6-13 ans) à la marche et à la course. Extraite de Robertson et coll. (2000)*

En sciences de l'activité physique et du sport, les échelles issues des travaux de Gunnar Borg (Borg & Kaijser, 2006; Borg, 1998; Borg et al., 1985; Borg et al., 1987) représentent l'étalon d'or de mesure de la perception de l'effort au cours d'exercices physiques. Cela a été validé dans la planification d'entraînements chez les athlètes (American College of Sports, 2000; Eston & Parfitt, 2018; Impellizzeri et al., 2004) ainsi qu'auprès de populations symptomatiques (Pina et al., 2003; Ries et al., 2007). Les échelles de Borg sont construites afin d'évaluer les fonctions psychophysiques au cours de l'exercice, c'est-à-dire en se basant sur le fait que le stress physiologique augmente de façon linéaire avec l'intensité de l'exercice et que la perception de l'effort suit une trajectoire similaire (Borg, 1998). Plus précisément, le terme échelle psychophysique réfère à la mesure de la variation des intensités perçues par rapport aux intensités physiques ou physiologiques. Finalement, les échelles de Borg permettent une estimation fiable et valide de l'effort perçu et permettent les comparaisons inter sujets. En cela, elles sont

utilisées dans la prescription d'exercice dans un cadre de performance (American College of Sports, 2000; Capostagno et al., 2016) ou de réhabilitation (Goosey-Tolfrey et al., 2010; Lacroix et al., 2019).



**Figure 6. Échelles de Borg, extraites de Borg (2006).**

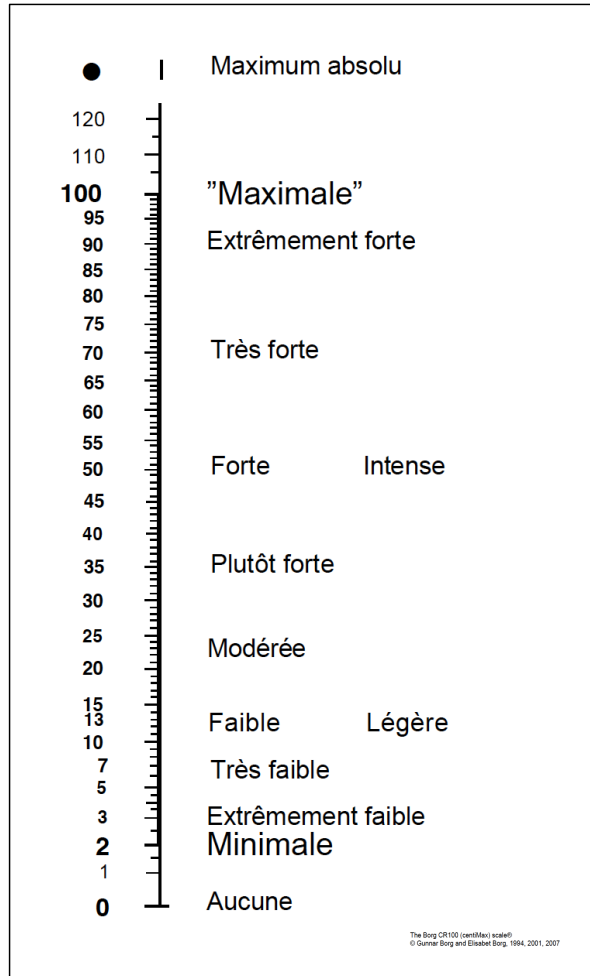
*Panel A: Échelle de Borg RPE (Borg, 1972, 1998)*

*Panel B: Échelle de Borg CR10 (Borg, 1982, 1998)*

L'échelle de Borg RPE (figure 2), aussi appelée échelle 6-20, a été développée dans la cadre d'exercice aérobie pour mesurer la perception de l'effort. Le chiffre 20 réfère au « maximum absolue », c'est à dire une intensité que la plupart des individus n'ont jamais atteint dans leur vie. Il s'agit davantage d'un construit hypothétique selon Borg. Le chiffre 19 correspond à l'intensité la plus élevée que la plupart des individus n'aient jamais connu, comme courir très vite pendant plusieurs minutes ou porter des charges si lourdes qu'on peut à peine accomplir la tâche. Cependant, la plupart des gens peuvent imaginer une intensité plus forte encore que leur expérience vécue à 19, d'où la quotation « 20 ». Cette

échelle est idéale pour monitorer la perception de l'effort au cours d'exercice aérobic avec peu de fluctuations dans la charge de travail imposée (Borg & Kaijser, 2006; Foster et al., 2001). En effet, la corrélation de l'échelle RPE avec certaines variables physiologiques de l'intensité de l'exercice comme la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène (VO<sub>2</sub>, McCulloch et al., 2018) a été mise en évidence. La perception de l'effort augmente ainsi de façon linéaire avec la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène (Borg, 1998)

Les échelles de catégories (figure 2, panels B et figure 3, Borg & Borg, 2002; Borg, 1998) permettent d'associer des descripteurs verbaux (*p. ex.*, léger, modéré, intense) à un nombre qui réfère à la mesure de l'intensité du phénomène. Ces échelles de catégories ne sont pas déterminées par les fonctions physiologiques ou les mesures d'intensité de l'exercice mais par des critères psychophysiques internes (Borg, 1998). Puisqu'il est difficile de mesurer les aspects qualitatifs d'une perception via des outils quantitatifs, les échelles de catégories proposent de mesurer la variabilité et la magnitude d'une perception. Cela est possible via la comparaison (ou la similitude) de l'expérience vécue aux expériences antérieures. L'individu peut donc estimer sa perception actuelle sur la base de ses perceptions antérieures et la reporter à l'aide de ces échelles de catégories (Borg, 1998). Finalement, les descripteurs verbaux associés aux chiffres sont positionnés sur l'échelle de manière à obtenir un ratio. Cela permet à l'échelle d'avoir les mêmes propriétés qu'une échelle de mesure quantitative et facilite son utilisation dans une collecte de données.



**Figure 7. Échelle CR100, extraite de Borg (1994)**

L'échelle de Borg CR10 (figure 2, panel B) créée en 1981 permet de reporter la perception de l'effort selon une graduation bipolaire de 0 (« aucune ») à 10 (« maximale »). Lorsque l'effort perçu par le sujet est le plus intense qu'il ait jamais expérimenté, il peut reporter sa perception de l'effort au-delà de 10 afin d'éviter l'effet plafond (*ceiling effect*).

L'échelle CR100 de Borg (figure 3), aussi appelée CentiMax, a été développée en 1994 (Borg, 1994). En palliant au manque de précisions des échelles existantes, l'échelle CR100 est reconnue comme la plus qualitative dans l'évaluation de l'intensité de la perception de l'effort (Borg & Kaijser, 2006). En effet, les participants ont généralement tendance à utiliser les chiffres exact associé au descripteur verbal (*p.ex.* « 5 » correspond à « fort » sur l'échelle CR10). Cela restreint les choix du sujet puisqu'il désigne spontanément des ratios préétablis et semble moins attentif à ses propres perceptions. Cette



tendance est moindre avec l'échelle CR100 (25%) par rapport à l'échelle CR10 (34-37%), comme démontré par Borg and Kaijser (2006).

Dans un souci de reproductibilité des résultats et de validité de la mesure, Borg (1998) et Pageaux (2016) insistent sur la nécessité d'utiliser des instructions rigoureuses. Nous avons vu précédemment que l'inclusion d'autres sensations liées à l'effort dans la définition de la perception de l'effort peut être un facteur confondant et donc mener à des biais dans l'analyse des résultats. Inclure les points suivants permet de s'assurer qu'on mesure bien ce qu'on tente de mesurer : la perception de l'effort.

1. Les instructions données au participant doivent inclure la définition de la perception de l'effort.
2. Les instructions doivent spécifier la différence entre ce qui est mesuré (l'effort) et les potentiels facteurs confondants (dont les autres sensations liées à l'exercice).
3. L'effort perçu diffère en fonction du type d'exercice et des masses musculaires mobilisées. Il est nécessaire de décrire au sujet comment reporter sa perception de l'effort selon les modalités de l'exercice. Par exemple, au cours d'une flexion du coude (*biceps curl*), on demandera « À quel point soulever le poids avec ton bras te paraît difficile ? », en insistant sur le fait que la perception décrite doit concerner uniquement la tâche réalisée avec le bras. Lors d'un exercice qui fait appel à l'ensemble du corps comme la course, on demandera : « À quel point l'exercice te paraît éprouvant et difficile ? ». Il faudra préciser cette fois-ci que la perception décrite est plus globale et désigne l'ensemble des ressources mobilisées pour réaliser la tâche.
4. Il est essentiel que les participants reportent leur perception de l'effort seulement après avoir lu le descripteur verbal correspondant au chiffre en question (« Modérée » avant « 3 » dans le cas de la CR10).
5. Pour faciliter la compréhension du participant, il convient de donner des exemples basés sur des souvenirs ou des exercices physiques antérieurs (*memory-anchoring and exercise-anchoring*). Pour une tâche cognitive, on expliquera : « l'effort maximal (le chiffre le plus élevé) correspond à l'effort le plus difficile que vous

- avez fait ». Pour un exercice physique, on précisera « l'effort maximal correspond à un exercice physique mené jusqu'à épuisement ».
6. Pour éviter l'effet plafond, les sujets doivent être informés qu'ils ont la possibilité de reporter leur perception de l'effort au-delà de la valeur maximale proposée (*p. ex.* > 100 sur l'échelle CR100).
  7. La perception de l'effort doit être mesurée au cours de l'exercice autant que possible et non après. Si cela n'est pas réalisable, la question posée au sujet doit explicitement porter sur les sensations expérimentées au cours de l'exercice et non au repos.
  8. Une session de familiarisation est recommandée afin que les sujets puissent apprendre à utiliser l'échelle et éviter des sous-estimations ou des surestimations de la perception de l'effort. Ils doivent également être capables de différencier l'effort des autres sensations liées à l'exercice.

Dans le cadre de ce mémoire et travail expérimental associé, nous utiliserons l'échelle CR100.

## B. Corrélats physiologiques de l'effort

Il est possible de mesurer la perception de l'effort de façon objective, via des corrélats physiologiques de l'effort. Les échelles de catégories développées par Gunnar Borg (Borg, 1962) permettent de rendre compte de l'intensité de l'exercice et des réponses physiologiques associées. Parmi ces dernières, la fréquence cardiaque est le corrélat le plus aisé à mesurer sur le terrain (Borg et al., 1985). Borg et Kaisjer (2006) rapportent que l'augmentation quasi linéaire de la fréquence cardiaque avec la puissance est suivie de près par les demandes musculaires en oxygène et, ainsi, constitue un corrélat de choix. Une corrélation importante est également rapportée entre la fréquence cardiaque et l'échelle RPE 6-20 ( $r = .74$ ,  $p > .001$  ; Scherr et al., 2013). Foster et collaborateurs (1998) mettent en évidence des coefficients de corrélation individuels entre  $.75$  et  $.90$  pour la fréquence cardiaque et la RPE. De ce fait, les échelles de Borg sont largement utilisées pour prescrire l'intensité de l'exercice en fonction de la fréquence cardiaque (American College of Sports, 2000; Eston et al., 1987; Williams & Eston, 1989).

D'autre part, fréquence respiratoire est identifiée comme une des variables physiologiques la mieux corrélée à la perception de l'effort dans l'étude de Nicolo et collaborateurs (2016) . Les auteurs ont investigué les effets de l'exercice sur les réponses perceptuelles et physiologiques au cours d'exercice en endurance. Neufs hommes pratiquant le cyclisme à un niveau compétitif ont réalisé des contres la montre de 10, 20 et 30 minutes au cours desquels ils autorégulent l'intensité de l'exercice. La fréquence cardiaque, les échanges gazeux, la fréquence respiratoire, le volume courant et la perception de l'effort (échelle 6-20) ont été mesurés. Les auteurs ont constaté que la fréquence respiratoire augmente progressivement et de façon quasi linéaire avec la RPE au cours du temps jusqu'à atteindre des valeurs quasi-maximal à la fin de l'exercice. Parmi les paramètres cardiorespiratoires, la fréquence respiratoire était la seule variable qui présentait de manière constante une évolution similaire à la RPE peu importe la durée de l'exercice. Ce paradigme se vérifie dans d'autres modalités d'exercice : dans des épreuves continues (Davies, 2009, Kift, 2007) et intermittentes (Nicolò et al., 2014) menées jusqu'à épuisement ainsi que dans des contres la montre continus (Wüthrich, 2014) et intermittents (Nicolò et al., 2014).

D'autre part, la fréquence respiratoire et la RPE répondent de manière similaire à différentes interventions expérimentales qui altèrent la performance, tel que l'induction de fatigue musculaire post exercice (Davies et al., 2009) et l'augmentation de la température corporelle (Hayashi et al., 2006). Ces résultats sont supportés par le rôle de la commande motrice centrale dans la régulation de la ventilation et de la perception de l'effort au cours de l'exercice. La commande motrice centrale renvoie à l'activité des cortex moteurs et pré-moteurs associé à la contraction musculaire volontaire (de Morree et al., 2012). La décharge corollaire, une copie de cette commande motrice centrale, se projette à la fois vers les centres respiratoires médullaires contribuant à la ventilation motrice pendant l'exercice (Paterson, 2014) et vers les zones sensorielles du cerveau à l'origine de la perception de l'effort (Berchicci et al., 2013; de Morree et al., 2012; de Morree et al., 2014; Marcora, 2009). La décharge corollaire de la commande motrice centrale génère non seulement l'effort global mais aussi l'effort respiratoire. Cela explique que la dyspnée fasse partie intégrante de la perception de l'effort globale (Grazzini et al., 2005; O'Donnell et al., 2007).

La décharge corollaire serait traitée par les aires sensorielles du cerveau pour générer la perception de l'effort (Enoka, 1992, Marcora, 2009). C'est pourquoi on parle de la perception de l'effort comme d'une « sensation d'innervation », significativement corrélée avec la magnitude de la commande motrice centrale (Jones, 1972). Le potentiel cortical lié au mouvement (MRCP) est identifié comme une mesure directe de la commande motrice centrale et peut être mesuré via encéphalographie au moment de l'initiation de la contraction musculaire volontaire (Shibasaki & Hallett, 2006). L'initiation du potentiel cortical lié au mouvement se fait au niveau des cortex supplémentaires et pré-supplémentaires, du cortex pré-moteur et du cortex moteur primaire (Deecke & Kornhuber, 2003; Ikeda & Shibasaki, 2003; Shibasaki & Hallett, 2006).

De Morree et collaborateurs (2012) mettent en évidence la relation entre le potentiel cortical lié au mouvement et la perception de l'effort au cours de flexions dynamiques unilatérales du coude avec un poids léger (20% de la répétition maximale) et lourd (35% de la répétition maximale). Les poids sont soulevés avec un bras fatigué, où de la fatigue musculaire a été induite via un protocole d'exercice excentrique, et un bras non-fatigué (contrôle). Puisque la perception de l'effort augmente à la fois avec le poids et la fatigue

musculaire, l'amplitude du potentiel cortical lié au mouvement doit augmenter dans les deux conditions expérimentales pour qu'il puisse être qualifié de corrélât neurologique de la perception de l'effort (Cacioppo et al., 2007). La manipulation expérimentale a induit une augmentation significative de la RPE et de l'amplitude de l'électromyogramme du biceps brachial avec l'augmentation du poids soulevé. Ces changements sont accompagnés d'une augmentation significative de l'amplitude du potentiel cortical lié au mouvement. Cette augmentation s'explique par une augmentation de l'activation musculaire, donc de la commande motrice centrale, pour soulever la même charge en présence de fatigue musculaire.

Cela se traduit également par des valeurs de RPE plus importantes. Finalement, la corrélation significative entre la RPE et le potentiel cortical lié au mouvement, indice de la commande motrice centrale, vient renforcer la théorie de la sensation d'innervation.

D'autres études montrent des effets similaires de la fatigue musculaire (Jankelowitz & Colebatch, 2005; Spring et al., 2016) et mentale (Jacquet et al., 2021) sur l'amplitude du potentiel cortical lié au mouvement. D'autre part, De Morree et collaborateurs (2014) ont investigué les mécanismes par lesquels la caféine diminue la perception de l'effort. Ces effets ergogènes s'expliquent par une diminution significative du potentiel cortical lié au mouvement après l'ingestion de caféine (6mg/kg) au cours d'extensions de genou isométriques sous-maximales. Cette diminution du potentiel cortical lié au mouvement est corrélée avec la diminution de la RPE sur l'échelle CR10 de Borg (Borg, 1998). La réduction de l'activité des aires motrices et pré-motrices du cerveau semble être la meilleure explication à la diminution de l'activité du potentiel cortical lié au mouvement au cours des contractions musculaires. Néanmoins, cette étude ne montre pas de corrélations entre l'électromyogramme du vaste latéral du quadriceps et le potentiel cortical lié au mouvement.

Non seulement cette étude permet de confirmer et d'élargir les résultats de l'étude de 2012 De Morree et collaborateurs, mais aussi d'identifier potentiellement le type de décharge corollaire à l'origine de la perception de l'effort. En effet, il existe deux types de décharges corollaires : centrales (issues des aires cérébrales) ou ré-afférentes (au croisement de la moelle épinière et du système nerveux périphérique via la boucle fusimotrice et les fuseaux musculaires). Dans cette étude, l'amplitude de l'électromyogramme n'est affectée ni par la

caféine, ni par le temps. Il n'y a donc pas de changement significatif sur l'activité fusimotrice : les effets du temps et de la caféine sur la perception de l'effort ne peuvent pas être expliqués pas des décharges corollaires ré-afférentes. Ces résultats suggèrent plutôt que les décharges corollaires centrales contribuent à la perception de l'effort.

L'activité électrique musculaire, mesurée par électromyographie, est également considérée comme un indice de la commande motrice centrale (Siemionow et al., 2000). En effet, de nombreuses études utilisent l'EMG de différents muscles impliqués directement (Amann et al., 2011; de Morree & Marcora, 2013) ou non (de Morree & Marcora, 2010) dans la tâche pour estimer l'amplitude de la commande motrice centrale. Des corrélations positives entre la perception de l'effort et l'amplitude de l'électromyogramme du biceps brachial (de Morree et al., 2012), du muscle corrugateur du sourcil (de Morree & Marcora, 2010) et des muscles de l'avant-bras (Korol et al., 2017) ont été montrées expérimentalement. Néanmoins, la corrélation entre électromyogramme et perception de l'effort n'est pas parfaite (de Morree et al., 2014), ce qui est cohérent puisqu'il s'agit d'une activation musculaire, mesurée à la périphérie. En effet, la perception de l'effort reflète la commande motrice intégrée au niveau central (Marcora, 2010b). Celle-ci est envoyée aux muscles actifs et peut être mesurée via électromyographie. Finalement, il l'électromyographie constitue davantage une estimation indirecte qu'une mesure parfaite de la commande motrice centrale.

D'autre part, l'électromyographie peut être impactée par de nombreux facteurs dont des changements d'inhibition au niveau cortical, spinal ou d'autres changements du milieu musculaire (Farina et al., 2014; Taylor et al., 2016). L'amplification du signal via des effets de filtrages peut aussi altérer la sensibilité de l'électromyogramme et donc sous-estimer la commande motrice (Amann et al., 2008).

Dans le contexte de ce mémoire et travail expérimental associé, nous utiliserons l'EMG des muscles principaux impliqués dans la tâche ainsi que la fréquence cardiaque et respiratoire comme corrélats physiologiques de l'effort.

## 4. Performance et perception de l'effort

### A. Régulation de la performance d'endurance

La perception de l'effort nous informe sur la difficulté de la tâche (Preston, 2009), est impliquée dans l'adaptation du coût énergétique, permet l'autorégulation des comportements et contribue au sentiment de volonté consciente (Preston, 2009). Récemment, la perception de l'effort a été identifiée comme déterminant dans la performance sportive (Englert et al., 2020; Marcora & Staiano, 2010; Pageaux, 2014).

Le modèle psychobiologique de la performance d'endurance (Marcora, 2010a) propose d'expliquer les effets des manipulations physiologiques (Marcora, 2008a) et psychologiques (Marcora, 2009; Pageaux et al., 2013) lors d'exercice en endurance mené jusqu'à épuisement. Sa validité a également été observée au cours d'exercice contre la montre où la performance est altérée par des manipulations psychologiques (fatigue mentale ; Pageaux, 2014) et physiologiques (fatigue musculaire ; de Morree & Marcora, 2013).

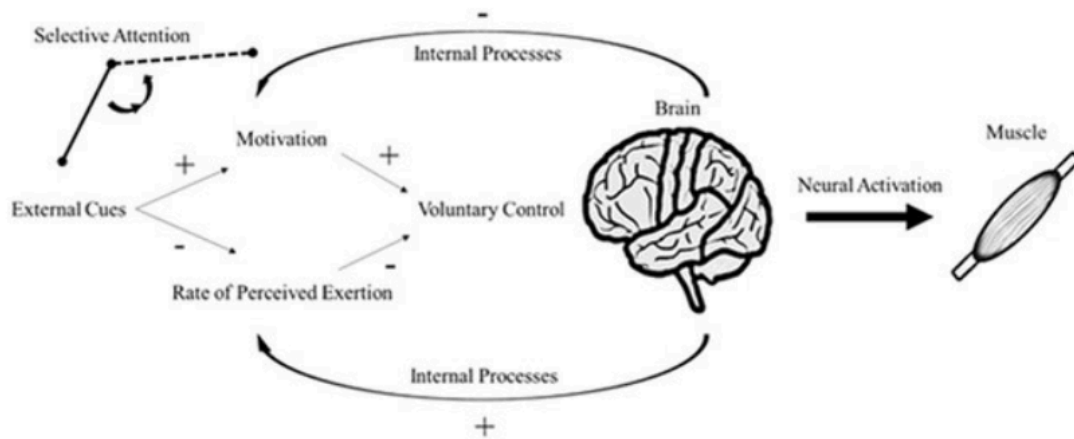
Le modèle psychobiologique de la performance d'endurance a pour principe la prise de décision basée sur l'effort (« *effort-based decision-making* ») et s'appuie sur la théorie de l'intensité de la motivation (Brehm & Self, 1989). Ce modèle propose que la régulation consciente du rythme de course ( *pacing* ) soit déterminée par cinq facteurs cognitifs et motivationnels : la perception de l'effort, la motivation potentielle, la connaissance de la distance/durée de l'exercice, la connaissance de la distance/durée restante et les expériences antérieures.

La motivation potentielle réfère à l'effort maximal que l'individu est prêt à réaliser pour atteindre un objectif. Elle peut facilement être influencée par des facteurs externes comme le contexte dans lequel est réalisé la performance (compétition ou rencontre amicale, exercice réalisé seul ou en groupe, conditions environnementales...) (Marcora, 2010b). La connaissance de la distance/durée de l'exercice ainsi que les perceptions de l'effort expérimentées antérieurement sont des facteurs intrinsèques à l'athlète. Ces

facteurs peuvent expliquer le sprint final à la fin d'une course (Marcora, 2008b) ou les différences de régulations du rythme de course entre les athlètes (Joseph et al., 2008).

Au cours d'une épreuve de course, Marcora (2008) suggère qu'il n'est pas possible d'anticiper consciemment et avec précision l'effort perçu et la vitesse de course. Étant donné qu'il est primordial de terminer la course, les athlètes choisissent généralement un rythme de course « conservateur ». En d'autres termes, ce rythme permet de maintenir des ressources à disposition et de ne pas atteindre l'épuisement avant la ligne d'arrivée. Vers la fin de la course, lorsque l'information fournie par la sensation consciente d'effort est davantage fiable, ces athlètes réalisent qu'ils peuvent augmenter leur vitesse de course et se lancent dans un sprint final.

Enfin, les expériences antérieures réfèrent aux perceptions de l'effort que l'individu a pu expérimenter au cours d'exercices physiques d'intensité et de durée variées. L'expérience actuelle est donc influencée par les expériences antérieures et elles jouent un rôle dans la prise de décision à l'exercice.



**Figure 8. Illustration du modèle psychobiologique de la performance d'endurance.**

*Le signe « + » représente un effet positif sur la réponse subséquente tandis qu'un signe « - » représente un effet négatif sur la réponse subséquente (p.ex. processus internes qui diminuent la motivation et augmente la RPE).*

*Extrait de (Bigliassi, 2015). Corollary Discharges and fatigue-related symptoms: the role of attentional focus.*



Dans ce modèle, la perception de l'effort constitue la composante centrale puisque l'effort perçu de l'athlète détermine l'intensité de l'exercice. En ce sens, lorsque la perception de l'effort est altérée par la fatigue (p.ex. périphérique, centrale, mentale) ou augmentée via des interventions pharmacologiques (Smith, 2003, ; Gallagher, 2001), l'athlète va modifier consciemment sa vitesse de course (Watson et al., 2005). Cette réponse a pour but de compenser les effets des manipulations expérimentales sur la perception de l'effort qui améliore (si la perception de l'effort est diminuée) ou diminue (si la perception de l'effort est augmentée) la performance d'endurance à intensité autorégulée (Pageaux, 2014).

Pour les tests menés jusqu'à épuisement, le modèle psychobiologique propose que l'incapacité à poursuivre la tâche n'est pas causé par la fatigue musculaire mais par la décision consciente de se désengager de la tâche (Marcora, 2008a). Plus précisément, le désengagement de la tâche se produit lorsque a) l'effort requis par la tâche atteint l'effort maximal que le sujet est prêt à investir pour réussir la tâche (p.ex. motivation potentielle) ou b) lorsque la poursuite de l'exercice est perçue comme impossible (Wright, 1996). Finalement l'épuisement constitue une forme de désengagement de la tâche plutôt qu'une défaillance physiologique (Marcora, 2008a). L'effort reporté est en effet maximal ou très haut à l'épuisement alors que les réserves énergétiques ne sont pas complètement épuisées (Marcora, 2019; Marcora & Staiano, 2010; Morales-Alamo et al., 2015).

Le modèle psychobiologique de la performance d'endurance s'appuie sur les postulats théoriques du modèle de la décharge corollaire (de Morree et al., 2012; Marcora, 2009; Pageaux et al., 2014). En effet, l'augmentation de la perception de l'effort en réponse à la fatigue musculaire (de Morree & Marcora, 2013) ou mentale (Martin, 2016; Pageaux & Lepers, 2018; Pageaux et al., 2015; Smith et al., 2015) induit une augmentation de la commande motrice centrale. Cela se traduit par une altération de la décharge corollaire et, finalement, de la performance (Pageaux, 2014).

Bien que le modèle psychobiologique de la performance d'endurance soit débattu, celui-ci n'a pas encore été réfuté. En effet, toutes les études ayant induit des altérations de la perception de l'effort, grâce à des manipulations expérimentales psychologiques ou physiologiques, ont démontré une altération de la performance d'endurance. D'autre part,

ce modèle s'applique aussi bien aux performances d'endurance impliquant le corps entier (de Morree & Marcora, 2012; de Morree & Marcora, 2013) qu'aux performances d'endurance des membres supérieurs (de Morree et al., 2012) et inférieurs (Pageaux et al., 2016; Pageaux et al., 2013).

## B. Régulation de la performance motrice

Récemment, le rôle de la perception de l'effort dans le contrôle moteur et le coût énergétique a été investigué. Selinger et collaborateurs (2015) proposent que l'homme possède un système de régulation du mouvement qui priorise l'économie d'énergie. Le système nerveux central régulerait de façon subconsciente le coût énergétique au cours de la locomotion. Marcora (2015) suggère plutôt que le contrôle objectif exercé par le système nerveux central au cours de la locomotion vise en réalité à minimiser la perception de l'effort. Il ne s'agit donc pas d'économie d'énergie mais plutôt d'un principe du moindre effort. Il s'appuie sur le travail d'Hreljac (1993) qui établit la vitesse de transition préférée par des sujets entre la marche et la course. Bien que la marche soit moins coûteuse énergétiquement à un certain seuil (2.067 m/s, SD  $\pm$  125m/s), les participants se mettent spontanément à courir car leur perception de l'effort est moindre à cette vitesse. Dans ce contexte, courir est donc perçu comme moins difficile et intense même si la coût énergétique est plus grand comparativement à la marche.

Ce système de contrôle basé sur la perception de l'effort plutôt que le système nerveux central permettrait d'expliquer pourquoi les individus sont capables d'adapter la fréquence de leur pas en temps réel. La rapidité avec laquelle la commande motrice centrale envoyée aux muscles squelettiques actifs est traitée corrobore avec la vitesse de traitement de la décharge corollaire, à l'origine de la perception de l'effort (de Morree et al., 2012; Zénon et al., 2015). A l'inverse, les traitements relativement lents des signaux sensoriels produits par les intérocepteurs dans le contrôle des métabolites musculaires et de la gazométrie artérielle ne permettent pas d'expliquer cette adaptation immédiate de la fréquence de pas (Marcora, 2015).

Au-delà de la locomotion, il a été récemment proposé que la perception de l'effort est impliquée dans le contrôle moteur des bras (Cos, 2017b; Wang et al., 2021). Morel et

collaborateurs (2017) étudient le lien entre la prise de décision, le contrôle moteur et l'effort subjectif. Ils demandent à des participants de choisir le mouvement qui demande le moins d'effort entre des mouvements de bras aux coûts énergétiques différents. Les résultats suggèrent que la prise de décision est influencée par la perception de l'effort subjective des participants (Cos, 2017b). Celle-ci intervient précisément dans l'évaluation du ratio coûts/bénéfices et l'économie de l'effort. Même lorsqu'il s'agit d'un contrôle moteur différent de celui de la locomotion, en l'occurrence les membres supérieurs, la prise de décision semble être régie par l'économie d'effort plutôt que celle du coût énergétique. Le choix entre différents mouvements est déterminé par l'effort mais également les bénéfices qui lui sont associés (Shadmehr et al., 2016; Wang et al., 2021). Finalement, la perception de l'effort est un facteur essentiel de la génération de mouvement et de la prise de décision dans le contexte du contrôle moteur des membres supérieurs (Alexander, 1997).

### C. Régulation de la performance lors de tâches motrices des membres supérieurs et perception de l'effort

Étant donné l'omniprésence des mouvements qui font appels aux membres supérieurs dans notre vie quotidienne, nous nous sommes intéressés aux études qui investiguent la perception de l'effort au cours de tâches motrices impliquant les membres supérieurs. Otto et collaborateurs (2018, 2019) étudient les désordres musculosquelettiques associés aux mouvements répétitifs des membres supérieurs. En effet, la fatigue induite par la répétition de mouvement des membres supérieurs est considérée comme le facteur le plus important des désordres musculosquelettiques du cou et des épaules liés au travail (Côté, 2014). La fatigue se manifeste également par l'augmentation de l'activité myoélectrique et de l'amplitude de l'EMG. Cela s'explique par une augmentation de la commande motrice et du recrutement d'unités motrices afin de maintenir la performance en présence de fatigue (Vøllestad, 1997).

En 2018, Otto et collaborateurs utilisent l'échelle CR10 (Borg, 1998) comme un marqueur de fatigue pour définir le critère d'arrêt de l'exercice. En effet, puisque la perception de l'effort augmente avec le temps et la fatigue (Pageaux & Lepers, 2016), les participants arrêtent la tâche lorsqu'ils atteignent 8 ou plus sur l'échelle ou qu'ils ne sont plus capables de continuer. D'autre part, Yang et collaborateurs (2019) utilisent la même échelle CR10

de Borg comme un critère de récupération au cours de tâches de pointage répétées. Lorsque le niveau d'effort est de retour au niveau de base mesuré en amont du protocole expérimental, les participants recommencent la tâche. Au-delà de mettre en évidence la versatilité des échelles psychophysiques de mesure de la perception de l'effort, le but de ces études est d'induire de la fatigue afin d'étudier les troubles musculosquelettiques. Comme nous l'avons vu précédemment, la fatigue est un facteur confondant lors de la mesure de la perception de l'effort. En effet, les fatigues physiques et mentales (Pageaux & Lepers, 2016) sont reconnues comme augmentant la perception de l'effort. Il semble donc crucial d'explorer le lien entre perception de l'effort et performance lors de tâches motrices des membres supérieurs en absence de fatigue.

## 5. But de l'étude

A notre connaissance, il n'existe pas d'études qui manipulent la demande physique de tâches motrices des membres supérieurs avec différents niveaux de difficultés pour étudier la perception de l'effort. C'est la raison pour laquelle nous souhaitons étudier l'évolution de la perception de l'effort dans un contexte où la difficulté de la tâche est manipulée, en absence de fatigue, lors de tâches motrices des membres supérieurs. La manipulation des tâches est réalisée via l'ajout d'un poids ou d'un tempo, avec différents niveaux de difficultés et de performance. Nous faisons l'hypothèse que la performance sera maintenue au prix d'une perception de l'effort supérieure. En effet, la théorie de l'intensité de la motivation suggère que pour maintenir la performance malgré l'augmentation de la difficulté la tâche, le sujet doit mobiliser davantage de ressources (Brehm & Self, 1989). Cela induit un plus grand niveau d'effort perçu (de Morree & Marcora, 2015). Nous souhaitons également tester la possibilité d'utiliser la perception de l'effort pour prescrire l'exercice. En prescrivant une intensité subjective à l'aide d'un score de l'échelle CR100 accompagné de son descripteur verbal, nous espérons que les participants autorégulent leur effort afin de parvenir à l'intensité prescrite.

L'échelle CR100 a été choisie pour sa précision, puisqu'elle est identifiée comme l'échelle psychophysique avec l'incrément la plus fine des échelles de Borg (Borg & Borg,

2002; Borg & Kaijser, 2006). Elle a été utilisée dans des tâches impliquant le corps entier, notamment en ce qui concerne le soccer (Fanchini et al., 2016; Scott et al., 2013) et le cyclisme (Viana et al., 2016). A notre connaissance, son utilisation dans un contexte de tâches motrices impliquant les membres supérieurs n'a pas été testé.

Notre protocole expérimental inclut deux tests couramment utilisés en clinique et en recherche. En effet, nous souhaitons que nos résultats soient transférables en réhabilitation ou en réadaptation au même titre qu'en recherche en neuroscience ou dans le vieillissement. L'utilisation du Test du Box and Block (TBB) dans l'évaluation de la dextérité manuelle a été validée auprès de populations vieillissantes (Desrosiers et al., 1994), d'individus vivants avec la fibromyalgie (Canny et al., 2009) et auprès de survivants d'accidents vasculaires cérébraux (Lin et al., 2010). La dextérité manuelle correspond à la capacité de réaliser des mouvements coordonnés de la main et des doigts afin de manipuler des objets et de réaliser des mouvements précis (Makofske, 2011). La dextérité manuelle inclue des processus cognitifs complexes tels que la planification et l'exécution de mouvement. C'est pourquoi la dextérité manuelle peut être affectée par le vieillissement et le déclin des fonctions cognitives qui lui sont associés (Carment et al., 2018; Vasylenko et al., 2018).

La tâche de pointage est utilisée en recherche, dans l'étude du compromis vitesse-précision au cours de la performance motrice (Missenard et al., 2009). La loi de Fitts est une modélisation du mouvement qui caractérise le compromis vitesse-précision (Fitts, 1954). Elle part du constat que lorsqu'une tâche motrice requiert de la précision, le temps pour réaliser cette tâche est plus long. A l'inverse, lorsqu'une tâche est effectuée rapidement, elle est moins précise. Au cours d'une tâche de pointage, la loi de Fitts modélise un indice de difficulté, c'est-à-dire dans quelle mesure la précision de la tâche affecte son temps de réalisation (Zhai, 2004; Zhai et al., 2004). Lorsqu'on demande à des sujets de pointer des cibles aussi rapidement et précisément que possible, ils doivent trouver un compromis entre la vitesse et la précision afin de répondre aux exigences de la tâche (Woodworth, 1899). Étant donné la pertinence de la tâche de pointage dans le contrôle moteur et le rôle suggéré

de la perception de l'effort dans sa régulation (Cos, 2017b), nous avons choisi de l'intégrer dans notre étude.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est de tester la possibilité de i) prescrire l'intensité de l'exercice à l'aide de la perception de l'effort et ii) d'observer les changements de perception de l'effort lorsque la difficulté de la tâche est altérée avec la manipulation de la demande physique. Pour ce faire, nous avons réalisé deux expériences en manipulant la demande physique des tâches afin d'altérer leur difficulté. Dans l'expérience 1, nous avons ajouté un poids ou imposé un tempo au cours du test du Box and Block (Mathiowetz, 1985) et d'une tâche de pointage (Missenard et al., 2009; Zhai et al., 2004). Nous faisons l'hypothèse i) qu'il est possible de prescrire différentes intensités d'exercice via la perception de l'effort, comme l'atteste une augmentation de la performance de la tâche lorsque l'intensité prescrite augmente ; et ii) que l'augmentation de la difficulté de la tâche se traduira par une perception de l'effort plus élevée. L'expérience 2 réplique la possibilité de prescrire l'exercice en utilisant la perception de l'effort et manipule la demande physique via un poids additionnel dans les conditions standardisées du Test du Box and Block. Nous faisons l'hypothèse que la performance sera maintenue au prix d'une perception de l'effort plus élevée.

*L'article présenté dans ce mémoire est en cours de relecture pour la soumission à la revue *Frontiers in Psychology*, édition spéciale effort.*

## II. Étude

### Perception of effort for prescribing and monitoring the exercise during upper-limb motor tasks

**Authors : Payen de la Garanderie Marie<sup>1,2</sup>, Courtay Aymeric<sup>1,2,3</sup>, Féral-Basin**

**Camille<sup>1,2</sup>, Rainville Pierre<sup>2,4</sup>, Gaveau Jérémie<sup>3,4</sup>, Pageaux Benjamin<sup>1,2\*</sup>**

<sup>1</sup> École de Kinésiologie et des Sciences de l'Activité Physique (EKSAP), Faculté de médecine, Université de Montréal, Canada

<sup>2</sup> Centre de Recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal (CRIUGM), Canada

<sup>3</sup> INSERM UMR1093-CAPS, Université Bourgogne Franche-Comté, UFR des Sciences du Sport, Dijon, France.

<sup>4</sup> Département de Stomatologie, Faculté de médecine dentaire, Université Bourgogne Franche-Comté, UFR des Sciences du Sport, Dijon, France.

**\*Correspondence to:**

Benjamin Pageaux

CEPSUM, École de kinésiologie,

2100, boulevard Édouard-Montpetit,

Montréal, Québec,

H3T 1J4

Canada

[benjamin.pageaux@umontreal.ca](mailto:benjamin.pageaux@umontreal.ca)

## **Abstract**

**Purpose:** While the perception of effort (PE) is widely used to prescribe and monitor exercise during locomotor and resistance tasks, its use to prescribe and monitor exercise during upper-limb motor tasks remains unclear. This study aimed to test these possibilities.

**Methods:** Forty participants volunteered in two experiments. In experiment 1, by using a modified version of the box and block test (BBT) and a pointing task, four PE intensities were used to prescribe the exercise. The possibility of monitoring the exercise was investigated during these tests by monitoring changes in the rating of PE in response to three task difficulties manipulated with different tempo and weights added on the exercising forearm. Experiment 2 replicated the possibility of prescribing the exercise with the PE intensity during the BBT and explored the impact of adding weight on the exercising forearm on performance and PE during the standardized version of the BBT. Muscle activation, heart rate and respiratory frequencies were recorded. **Results:** In experiment 1, increasing the PE intensity to prescribe the exercise induced an increased performance between each intensity. Increasing task difficulty with higher movement tempo and adding weight on the forearm increased the rating of PE. Experiment 2 replicated the possibility to use PE intensity for exercise prescription during the BBT. When completing the BBT with an additional weight on the forearm, performance was maintained at a cost of a higher PE. In both experiments, muscle activation was the best physiological marker of PE. **Conclusion:** Our results suggest that PE is an efficient tool to prescribe and monitor exercise during upper-limb motor tasks.

262 words

**Keywords:** perceived exertion, manual task, CR100 scale, motor control, psychophysiology, Box and Block Test, Pointing Task. (Min.5-Max. 8).



## Introduction

The perception of effort, also known as perceived exertion or sense of effort (Marcora, 2010b; Pageaux, 2016), can be described as “*the particular feeling of that energy being exerted*”, and “*is accompanied by a sensation of strain and labour, a feeling that intensifies the harder a person tries*” (Preston, 2009). Effort is experienced during physical (e.g., running to catch the bus) or cognitive tasks (e.g., completing Sudoku) and in the context of self-restraint behaviour (e.g. smoking cessation ; Preston, 2009). Due to its omnipresence in our daily life, the perception of effort is growing in popularity amongst researchers. This perception is linked to the task intensity and the number of resources invested (Inzlicht et al., 2018); strongly influences the self-regulation of human behaviour (de Morree et al., 2015; Inzlicht et al., 2018); is one of the main features of fatigue in various contexts (Enoka & Stuart, 1992; Pageaux & Lepers, 2016); and is exacerbated in various pathologies such as chronic fatigue syndrome (Barhorst et al., 2020; Cook et al., 2017), stroke (Kuppuswamy et al., 2015), chronic kidney disease (Macdonald et al., 2012) or cancer (Fernandez et al., 2019). Perception of effort is a fundamental experience that directly influences our everyday decisions to engage or disengage in various actions, by providing monitoring of the cognitive and motor resources allocated to the tasks we perform (Pageaux, 2016; Preston, 2009). The perception of the effort invested in a task is also closely linked to the regulation of performance (Marcora, 2019; Pageaux, 2014, 2016). According to the motivation intensity theory (Brehm & Self, 1989; Richter et al., 2016), we maintain optimal performance by increasing effort when task difficulty increases and performance decreases when we are no longer able or willing to invest additional effort.

Concerning physical tasks, the perception of effort is widely investigated during locomotor exercises, such as walking or cycling, in both healthy and symptomatic populations (Au et al., 2017; Décombe et al., 2020; Flairty & Sheadler, 2020; Horstman et al., 1979; Zinoubi et al., 2018) to prescribe and monitor the exercise (Azevedo et al., 2016; Eston & Parfitt, 2018; Impellizzeri et al., 2004). Perception of effort is also investigated during isolated exercise involving the upper or lower limb in strength training program (Miller et al., 2009; Zourdos et al., 2016), in studies aiming at better understand the regulation of endurance performance (Maikala & Bhambhani, 2006; Pageaux et al., 2013) or the mechanisms associated with the development of muscle fatigue during

repetitive tasks (de Morree et al., 2012; Jacquet et al., 2021; Otto et al., 2019; Yang et al., 2019). Furthermore, to the best of our knowledge, most of the studies investigating how effort is perceived during task completion of various difficulties in the absence of fatigue are predominantly performed during locomotor exercises or isolated exercises performed with the lower limbs (de Morree et al., 2014; Faelli et al., 2019; Luu et al., 2016; Meir et al., 2015). It is also important to note that to date, most of the studies interested in the influence of perception of effort on motor control investigated the role of this perception by measuring the force output in the task or the decision made by the participants (Cos, 2017b; Shadmehr et al., 2016; Wang et al., 2021). While these methods present several advantages in the context of decision-making tasks, not considering the rating of perception of effort as the dependant variables limits the exploration of the subjective experience of the participant during task completion (Pageaux, 2016; Wang et al., 2021). As the perception of effort has been recently proposed to finely regulate motor control (Cos, 2017b) and thus, to affect decision-making and performance in a task involving movement regulation (Shadmehr et al., 2016; Wang et al., 2021), there is an urgent need for studies exploring the perception of effort during upper limb tasks with the rating of perception of effort being the dependent variables. Such studies could provide opportunities to better understand the interaction between perception of effort and motor control.

In this context, this study aimed to explore in healthy young adults performing upper limb motor tasks, the possibility to prescribe and monitor the exercise with the perception of effort. To do so, two experiments were performed with the manipulation of physical demand to alter the task difficulty. In the first experiment, by using a modified version of the classical box and block test (Mathiowetz, 1985) and a pointing task (Missenard et al., 2009; Zhai et al., 2004), we tested the possibility i) to prescribe exercise at different intensities with the perception of effort and ii) to monitor changes in perception of effort when task difficulty was altered with manipulation of the physical demand. As effort and its perception varied in relation to performance (Brehm & Self, 1989; Richter et al., 2016), we monitored perception of effort while controlling for performance. We hypothesized that i) it is possible to prescribe different exercise intensities with the perception of effort as attested by an increased task performance when the prescribed intensity of perceived effort increases; and ii) that the increased difficulty will be reflected in a higher perception of

effort. In the second experiment, by using the classical box and block test with its validated instructions, we tested the effect of increasing physical demand on subsequent performance and rating of perception of effort. We hypothesized that performance could be maintained at the cost of a higher perception of effort.

## Materials and methods

### 1. Participants

Twenty participants volunteered to participate in experiment 1 and twenty participants volunteered to participate in experiment 2. The description of the participants is available in Table 2. None of the participants had any pain-related, neurological, or psychological disorders nor did they have any somatic illnesses. Written informed consent was obtained from each participant. Experiment 1 took place at the Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal. Experiment 2 took place at the Université de Bourgogne. All participants gave written informed consent and all procedures were approved by the local ethics committee of each institution. As caffeine and sleep deprivation are known to increase the perception of effort (Morree et al., 2014), in both experiments participants were asked to refrain from ingesting caffeine at least 3 h before their visits and to get at least 7 h of sleep the night before (Temesi et al., 2013).

**Table 2. Description of the participants**

	Experiment 1		Experiment 2	
	Women (n = 18)	Men (n = 2)	Women (n = 7)	Men (n = 13)
Age (yrs)	24 ± 2	24 ± 2	26 ± 2	25 ± 2
Weight (kg)	62 ± 11	72 ± 14	59 ± 7	76 ± 10
Height (cm)	164 ± 10	187 ± 5	163 ± 6	178 ± 5.4
Physical activity (/30)	19.06 ± 5.4	23 ± 0	21.5 ± 6.3	23.6 ± 3.5
Right-handed	17	2	7	11
Left-handed	1	-	-	2

Yrs = years, kg = kilogram, cm = centimeter. The physical activity score was measured with the Dijon Physical activity questionnaire (Robert et al., 2004). Data are presented as mean  $\pm$  SD.

## **2. Upper limb motor tasks**

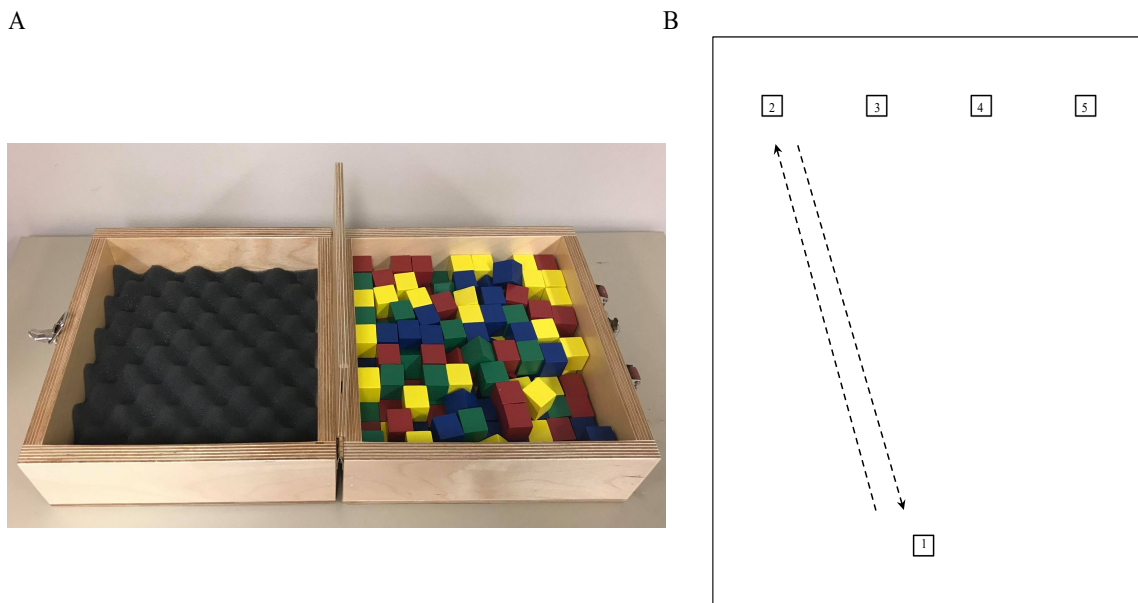
In this study, the upper limb motor tasks used were the Box and Block Test (BBT) and a Pointing Task (PT). A full description of these tests is available below. We chose these two tests for their relevance in the context of clinical settings as well as research.

### **a. Box and Block test**

The BBT (Mathiowetz, 1985), illustrated in Figure 9A, is used to assess manual dexterity, defined as “the ability to make coordinated hand and finger movements to grasp and manipulate objects” (Makofske, 2011). This test has been validated in several populations such as older adults (Desrosiers et al., 1994), fibromyalgia patients (Canny et al., 2009) and stroke rehabilitation (Lin et al., 2010). The test consists of a wooden box (53.7 cm x 25.4 cm x 8.5 cm) separated into two containers of 25.4 cm each. It includes 150 coloured wooden cubes (2.5 cm). Participants have to grasp one block at a time with the dominant hand, transport the block over the partition, and release it into the opposite compartment. Participants are asked to move as many blocks as possible in a given time, and performance is monitored as the number of blocks moved. Errors were visually counted by an experimenter when the fingertips did not go beyond the partition, and the associated block was not counted in the final score. Standardized instructions require participants to move as many blocks as possible in 60 s. In experiment 1, we used a 30 s modified version of the BBT where participants had to move the blocks at a prescribed effort intensity or by following a pre-determined tempo to control for the number of blocks moved (performance). In experiment 2, we used the standardized instructions in the absence and presence of additional weight on the dominant forearm. In both experiments, the compartment containing the block was placed front of the participants’ dominant hand.

## b. Pointing task

Pointing tasks (e.g., Domkin et al., 2002; Missenard et al., 2009) are used in research to study motor control. A PT was performed in experiment 1 only, and schematization of the PT performed is available in figure 9B. This figure also contains the between-targets distance. Participants had to go back and forth between targets (squares of 1 cm<sup>2</sup>) as quickly as possible in a given time. Participants started from target 1 (reference target) and had to follow a pre-determined order, depending on their dominant hand. Right-handed participants had to reach target 2 and come back to target 1, then to reach target 3 and come back to target 1, then to reach target 4 and come back to target 1, then to reach target 5 and come back to target 1. This sequence was repeated for 30 s, either with the instructions of reaching the targets at a prescribed effort intensity or by following a pre-determined tempo to control for the number of targets reached (i.e., performance). For left-handed participants, the order of the sequence was reversed, and they had to reach first target 5. Participants performed the test with a pencil in their hand and had to point where they reached, thus allowing an experimenter to visually control for the exact number of targets reached without any error.



*Figure 9. The Box and Block Test and a Pointing Task*

**Panel A:** Illustration of the Box and Block Test (Mathiowetz, 1985) used in experiments 1 and 2. Briefly, participants had to grasp one block at a time with the dominant hand, transport the block over the partition, and release it into the opposite compartment.

**Panel B:** Illustration of the Pointing Task used in experiment 1. Starting from target 1, participants had to go back and forth between each target. Right-handed participants started by reaching target 2 for their first-round trip, while left-handed participants started by reaching target 5 for their first-round trip. Measures are being taken from the center of all squares ( $1 \times 1$  cm). The distance between each upper square is 5.1 cm. Distance between targets 1-2 and 1-5 is 22.3 cm, respectively. Distance between targets 1-3 and 1-4 is 21 cm, respectively.

### 3. Overview of the two experiments

#### a. Experiment 1

This experiment aimed to test, with a modified version of the BBT and a PT, the possibility i) to use the perception of effort to prescribe exercise, and ii) to monitor changes in the rating of perception of effort when performance is controlled and task difficulty manipulated. i) To test the possibility of prescribing exercise with the perception of effort, we monitored performance associated with four intensities of perception of effort (presented in fig. 10A) ii) To test the possibility of monitoring perception of effort, and due to the interaction between effort and performance (Brehm & Self, 1989; Richter et al., 2016), we controlled for performance and altered task difficulty with manipulation of the physical demand in two ways: manipulation of the movement tempo, described hereafter as the *tempo session*; manipulation of additional weight on the forearm, described hereafter as the *weight session*. The *tempo session* and *weight session* were performed in two different laboratory visits, in a randomized order. An overview of the sessions is presented in figure 10B. All tests were performed in a seated position. At the onset of the first laboratory visit, participants completed several questionnaires allowing the characterization of the population studied (anthropometry, physical activity score; Robert et al., 2004), Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971). Then, each session was performed as described below, with all the trials related to the BBT performed in one block and all the trials related to the PT performed in another block. The order of each block (BBT performed first vs PT performed first) was randomized between participants and kept

constant for each participant between the two laboratory visits (*tempo session* vs *weight session*).

**Tempo session.** Participants were equipped with the apparatus allowing measurement of EMG, heart rate and/or respiratory frequency. We subsequently provided standardized instructions on how to use the psychophysical scale to monitor the perception of effort and how to perform the BBT and the PT. Participants had 1 min to familiarize themselves with each test and could ask any questions. Participants were allowed to perform a subsequent 1 min of familiarization with the task, if necessary, but none of them asked for an extra-familiarization. Following this familiarization, participants were asked to perform a block of trials for the BBT or PT. Each block consisted first of trials related to using the perception of effort intensity to prescribe the exercise, and second of trials where performance was controlled by different tempos and perception of effort was monitored. Trials related to the use of perception of effort to prescribe the exercise intensity consisted of performing one test of 30 s per intensity (light effort, moderate effort, strong effort and very strong effort), with each test interspaced by 30 s of recovery. The experimenter monitored performance for each prescribed intensity. Then, participants performed two tests of 30 s per difficulty (easy difficulty, medium difficulty, hard difficulty), with each test interspaced by 90 s of recovery. Once a block (BBT vs PT trials) was completed, a 120 s rest was given, and participants completed the other block following the same structure. Following pilot experiments, three tempos specific to each task were chosen to obtain three difficulties. For the PT, the following tempos were used: 1 Hz (easy difficulty), 1.5 Hz (medium difficulty) and 2 Hz (hard difficulty). For the BBT, the following tempos were used: 0.5 Hz (easy difficulty), 0.75 Hz (medium difficulty) and 1 Hz (hard difficulty). The order of difficulties was randomized. The rating of perceived effort was monitored immediately at the end of each repetition. Following the two repetitions of each difficulty, participants reported their perceived workload using the NASA TLX scale as described below.

**Weight session.** The procedures in the *weight sessions* are identical to the procedures in the *tempo session*, except that task difficulty was manipulated by adding weights (4-lb pair, Enhance Fitness) on the dominant forearm of the participant while performing the BBT

and PT at a fixed tempo (BBT: 0.75 Hz; PT: 1.5 Hz). The easy difficulty was performed with no additional weight (0 kg) on the forearm. The medium and hard difficulty was performed with additional weights on the forearm, 0.5 kg and 1 kg respectively.

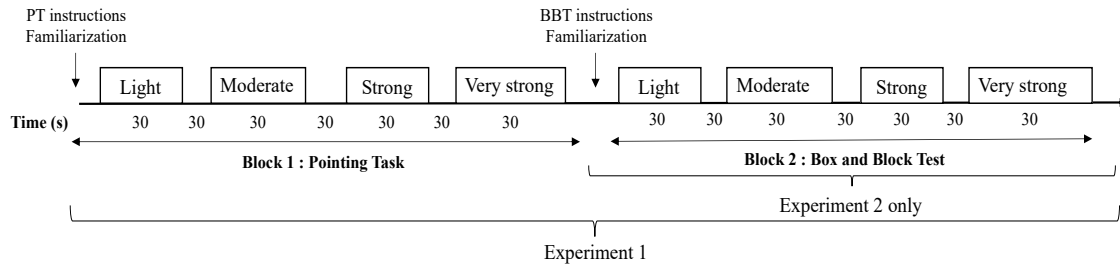
## **b. Experiment 2**

This experiment aimed to test, with the standardized instructions of the BBT, the effect of increasing physical demand to manipulate task difficulty on subsequent performance and rating of perception of effort. We also replicated the possibility to use the perception of effort to prescribe exercise. Participants visited the laboratory once. At their arrival, participants were equipped with the apparatus allowing measurement of EMG and heart rate. We subsequently provided standardized instructions on how to use the psychophysical scale to monitor the perception of effort and how to perform the BBT. Participants had 1 min to familiarize themselves with each test and could ask any questions. Following this familiarization, participants were asked to perform two blocks of trials. The first block consisted of trials related to using the perception of effort intensity to prescribe the exercise, as performed in experiment 1. In the second block of trials, participants completed the BBT according to the standardized duration of 60 s, in the absence (0 kg, easy difficulty) and the presence (0.5 kg, hard difficulty) of additional weight on the dominant forearm, interspaced by a 2 min 30 s recovery between difficulties. The order of the test (0 kg, easy difficulty vs 0.5 kg, hard difficulty) was randomized between participants and repeated after a 15 min break. In total, each participant repeated twice each difficulty

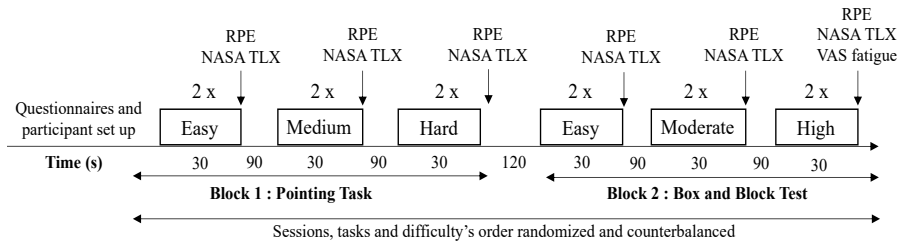
Pilot experiments revealed that the duration of 60 s with an additional weight of 1 kg, contrary to the duration of 30 s as performed in experiment 1, induced an important level of fatigue to the participants. Consequently, to limit the induction of fatigue, the hard difficulty was performed with a weight of 0.5 kg and the between difficulty recovery period was increased to 2 min 30. The rating of perceived effort and performance (*i.e.*, number of blocks moved) was monitored immediately at the end of each repetition (3 repetitions per difficulty, with the order of difficulty randomized). Following each difficulty, participants reported their perceived workload using the NASA TLX scale as described below. An overview of the session is presented in figure 10C.



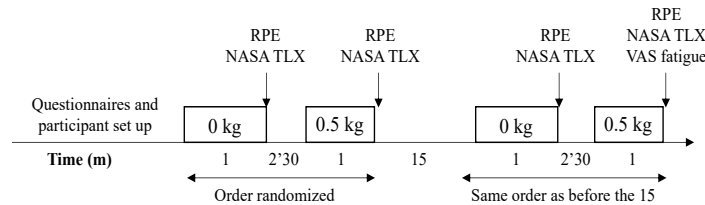
### A. Prescribing exercise with perception of effort (experiment 1 and 2)



### B. Experiment 1 : weight or tempo session



### C. Experiment 2 : weight manipulation during the Box and Block Test with its official instructions



**Figure 10. Overview of the experiments**

**Panel A:** an overview of the procedures used in experiments 1 and 2 to test the possibility to prescribe exercise using the perception of effort. Exercise was prescribed at four intensities of perceived effort via the CR100 scale: light (13/100), moderate (23/100), strong (50/100), very strong (70/100). While both the pointing task (PT) and the Box and Block Test (BBT) were performed in experiment 1, only the BBT was performed in experiment 2.

**Panel B: Experiment 1 overview.** Set up consisted of the placement of the respiratory frequency belt, heart rate monitor and the EMG surface electrodes. Then participants completed the indicated questionnaire or Visual Analog Scale (VAS). Participants performed two repetitions per level of difficulty with 30 s of recovery in between. Rating of Perceived Effort (RPE) and subjective workload using NASA TLX scale were assessed in-between each level of difficulty.

**Panel C: Experiment 2 overview.** Participants performed the Box and Block test for 60'' with the absence (0kg) or presence (0.5kg) of additional weight. Set up consisted of the

placement of the heart rate monitor and the EMG surface electrodes. Then participants completed the indicated questionnaire or scale.

#### **4. Psychological measurements**

*Perception of effort*, defined as the conscious sensation of “how hard, heavy and strenuous a physical task is” (Marcora, 2010; Pageaux, 2016), was monitored and used to prescribe the exercise with the CR100 scale (Borg & Kaijser, 2006). This scale ranges from 0 (“nothing at all”) to 100 (“maximal”) and includes verbal anchors, such as light (weak), moderate, strong (heavy) for intermediate values (Borg & Kaijser, 2006). Standardized instructions on how to use the CR100 scale to evaluate the perception of effort were provided at the onset of each session and participants were asked to exclude the perception of pain from their rating (Pageaux et al., 2020; Pageaux et al., 2016). To prescribe the exercise, participants were asked to perform the tasks at four different effort intensities associated with the following verbal anchors and numbers on the CR100 scale: light (13), moderate (23), strong (50) and very strong (70). To report their perception of effort, participants were asked to first refer to the verbal anchors and then to report a number that best represents the intensity of their perception. The CR100 scale was printed on a legal format (8.5 × 14) and fixed on a wall ~1 m in front of the participants.

*Perceived workload* was measured with the Nasa Task Load Index (NASA TLX; Hart & Staveland, 1988). In line with the aims of our study, only the three following subscales were considered: Physical Demand, Temporal Demand and Effort. Participants had to score each of the items 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.

*Fatigue*. The presence of fatigue is known to increase the perception of effort (Enoka & Stuart, 1992a; Pageaux & Lepers, 2016a) We consequently monitored feelings of fatigue at the beginning and the end of each visit with a visual analog scale (Le Mansec et al., 2017). Participants had to place a mark on a 100 mm line with bipolar end anchors (0 = not

fatigued at all; 100 = extremely fatigued). The fatigue score was determined by measuring the distance (in mm) from the left-hand end of the line to the mark made by the participant.

## 5. Physiological measurements

*Electromyography* (EMG) of the biceps brachii and triceps long head was measured in both experiments with adhesive, pre-gelled surface electrodes (Covidien, CA). Before placing the electrodes, the skin was shaved, cleaned with alcohol, and dried. Electrodes were placed using SENIAM recommendations (Hermens et al., 2000). The electrode reference was attached to the extremity of the elbow of the dominant arm. In experiment 1, EMG was recorded using a PowerLab system (26T, ADInstruments) with an acquisition rate of 1K/s and filtered with bandpass ranging from 20 to 400 Hz (auto adjust) and a notch filter with a center frequency of 60 Hz (auto adjust). Data were analyzed using the LabChart software (AD Instruments). In experiment 2, EMG was recorded using a Biopac system (MP150, Biopac Systems, Inc.) with an acquisition rate of 1 K/s and filtered with bandpass ranging from 20 to 400 Hz (auto adjust) and a notch filter with a center frequency of 60 Hz (auto adjust). Data were analyzed using Acknowledge software (Biopac Systems, Inc.). The root mean square (RMS) was automatically calculated with each software. Data were averaged for the last 5 s of each 30 s (experiment 1) or 60 s (experiment 2) trials. The EMG is reported as the sum of the triceps and biceps RMS values.

*Heart rate frequency* was measured in both experiments. In experiment 1, we used a finger pulse transducer (TN1012/ST, AD Instruments) placed on the non-dominant index finger. To limit movement artifacts, the non-dominant hand was placed on homemade support to rest on the table and stay as steady as possible. The signal was recorded with an acquisition rate of 1K/s and filtered with a digital filter of 7 Hz (low pass). Data analysis was automatically performed by the LabChart software. Heart rate frequency was averaged for the last 5 s of each 30 s trials. Due to numerous movement artifacts in experiment 1, we controlled for this issue in experiment 2 by monitoring heart rate frequency with a chest strap. Heart rate frequency was obtained via the paired Polar watch (Polar RS400; Polar Electro Oy, Kempele, Finland) and measured as the average of the 60 s trial via the experimenter pressing the start/stop button of the watch at the beginning and end of each

trial, and then recording the average heart rate frequency automatically calculated by the watch.

**Respiratory frequency** was measured in experiment 1 via a respiratory belt transducer (TN11132/ST, AD Instruments). The respiratory belt was fixed on the participant's chest, the signal was recorded with an acquisition rate of 1K/s and filtered with a digital filter of 7 Hz (low pass). Data analysis was automatically performed by the LabChart software. Respiratory frequency was averaged for the last 5 s of each 30 s trials. Respiratory frequency was not measured in experiment 2 due to the absence of such equipment in the laboratory where the experiment took place.

## Statistical Analysis

All data are presented as mean  $\pm$  standard deviation (Matthews et al.) in the text. Assumptions of statistical tests such as normal distribution and sphericity of data were checked as appropriate. Greenhouse-Geisser correction to the degrees of freedom was applied when violation to sphericity was present.

**For experiment 1**, all analyses subsequently described were performed for the modified BBT and PT. A  $2 \times 4$  repeated-measures ANOVA was used to assess the effects of visit (1 and 2) and effort intensity (light, moderate, strong, very strong) on performance, heart rate frequency, respiratory frequency and EMG RMS. As these analyses were performed to test the possibility to use the perception of effort to prescribe the exercise, a significant main effect of effort intensity was followed only with the following pairwise comparisons adjusted with the Bonferroni correction: light effort vs moderate effort, moderate effort vs strong effort, strong effort vs very strong effort.

To test the possibility to monitor changes in perception of effort when task difficulty is altered with manipulation of the physical demand in both *tempo* and *weight sessions*, a repeated-measures ANOVA was used to assess the effects of difficulty (easy, medium, hard) on heart rate and respiratory frequencies. Significant effect of difficulty was followed-up with pairwise comparisons adjusted with the Bonferroni correction. A Friedman ANOVA was used to assess the effects of difficulty on performance, rating of perceived effort, EMG RMS, as well as the physical demand, temporal demand and effort

subscales of the NASA TLX scale. Significant effect of difficulty was followed up with Wilcoxon signed-ranked tests adjusted with the Bonferroni correction.

**For experiment 2**, a repeated-measures ANOVA was used to assess the effects of effort intensity (light, moderate, strong, very strong) on performance, heart rate frequency and EMG RMS. As these analyses were performed to test the possibility to use the perception of effort to prescribe the exercise, a significant effect of effort intensity was followed only with the following pairwise comparisons adjusted with the Bonferroni correction: light effort vs moderate effort, moderate effort vs strong effort, strong effort vs very strong effort.

A  $2 \times 2$  repeated-measures ANOVA was used to assess the effects of repetition (1 and 2) and difficulty (easy and hard) on performance, heart rate frequency, EMG RMS, as well as the physical demand and effort subscales of the NASA TLX scale. As this experiment did not constrain the temporal demand of the task by imposing a tempo, we did not analyze the temporal demand subscale of the NASA TLX scale. If a repetition  $\times$  difficulty interaction reached significance, the following follow-up tests were performed and adjusted with the Bonferroni correction: repetition 1/0 kg vs repetition 2/0kg, repetition 1/0.5 kg vs repetition 2/0.5 kg, repetition 1/0 kg vs repetition 1/0.5 kg, repetition 2/0 kg vs repetition 2/0.5 kg.

**For both experiments**, all statistical analyses were performed using the Statistical Package for the Social Sciences software, version 27 for Mac OS X (SPSS, Chicago, IL). Effect sizes for the repeat measures ANOVA are reported as the partial eta squared ( $\eta_p^2$ ) provided by SPSS. Effects sizes for the pairwise comparisons are reported with  $r$  and calculated with Microsoft Excel according to the equations described below for parametric (i) and non-parametric (Myers et al.) tests (Field, 2005). Parameters  $t$ ,  $df$  and  $Z$  were provided by SPSS, and  $N$  corresponds to the number of total observations (Field, 2005).

$$(i) \quad r = \sqrt{\frac{t^2}{t^2 + df}} \qquad \text{(Myers et al.) } r = \frac{Z}{\sqrt{N}}$$

Significance was set at 0.05 (2-tailed). Thresholds for small, moderate and large effects were set at 0.1, 0.3 and 0.5 for  $r$  (Cohen, 1988).

# Results

## 1. Experiment 1

In this experiment, we used a modified version of the BBT and PT. We prescribed 30 s of exercise performed at four intensities of effort (light, moderate, strong and very strong) in two different visits. Performance, EMG RMS, heart rate and respiratory frequencies were monitored for each prescribed effort intensity. We also manipulated task difficulty (easy, medium, hard) by manipulating physical demand and imposing three tempos or adding three different weights on the participant's dominant forearm while performing the task at a fixed tempo. Performance, heart rate frequency, respiratory frequency, EMG RMS and the subjective workload were measured for each difficulty.

### a. Using the perception of effort to prescribe the exercise

Results of the main effects of effort intensity for the BBT and PT are presented in figures 11 and 12, respectively.

**Performance:** For the BBT (figure 11A), the main effect of visit did not reach significance [ $F(1,19) = 2.105, p = .163, \eta_p^2 = .099$ ]. Increasing the prescribed effort intensity resulted in an increased performance during the BBT [ $F(1.6, 31.2) = 172.335, p < .001, \eta_p^2 = .901$ ]. Follow-up test revealed an increase in performance between the light and moderate intensities [ $t(19) = 10.509, p < .001, r = .924$ ] as well as between the moderate and strong intensities [ $t(19) = 10.474, p < .001, r = .923$ ]. Performance increased between the strong and very strong intensities [ $t(19) = 7.191, p < .001, r = .855$ ]. The visit  $\times$  effort intensity interaction did not reach significance [ $F(3,57) = .401, p = .752, \eta_p^2 = .021$ ]. For the PT (figure 12A), the main effect of visit did not reach significance [ $F(1,19) = .749, p = .397, \eta_p^2 = .038$ ]. The main effect of effort intensity reached significance [ $F(1.6, 31.1) = 112.050, p < .001, \eta_p^2 = .855$ ]. Follow-up test revealed an increase in performance between the light and moderate intensities [ $t(19) = 8.162, p < .001, r = .882$ ] as well as between the moderate and strong intensities [ $t(19) = 10.681, p < .001, r = .926$ ]. Performance increased between the strong and very strong intensities [ $t(19) = 6.291, p < .001, r = .822$ ]. The visit

' effort intensity interaction did not reach significance [ $F(1.4,26.8) = 1.342, p = .270, \eta_p^2 = .065$ ].

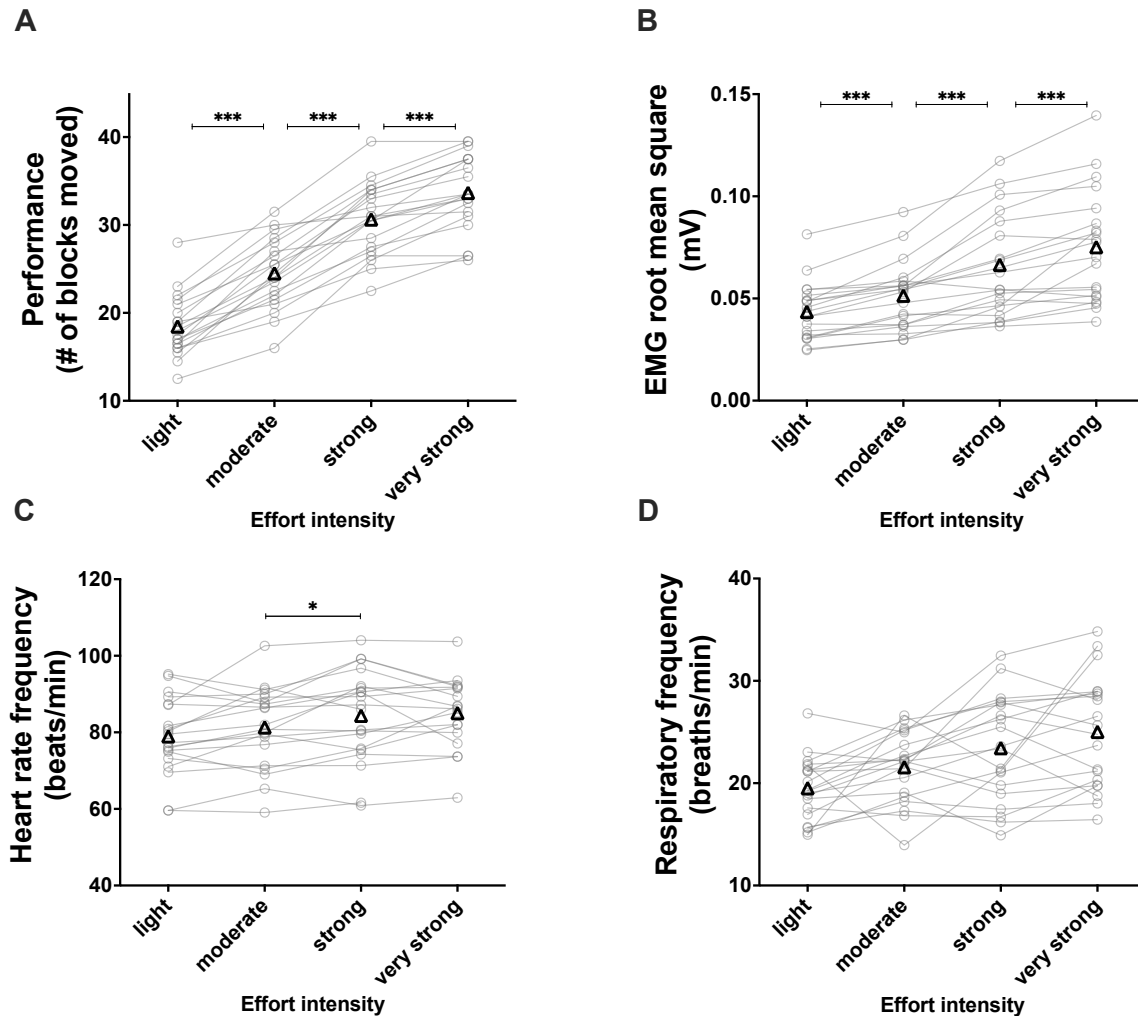
**EMG RMS:** For the BBT (figure 11B), the main effect of visit did not reach significance [ $F(1,18) = 2.377, p = .140, \eta_p^2 = .116$ ]. The main effect of effort intensity reached significance [ $F(1.4,24.7) = 37.667, p < .001, \eta_p^2 = .676$ ]. Follow-up test revealed an increase in EMG RMS between light and moderate intensities [ $t(18) = 5.904, p < .001, r = .812$ ]. as well as between the moderate and strong intensities [ $t(18) = 5.229, p < .001, r = .777$ ]. The increase in EMG RMS between the strong and very strong intensities reached significance [ $t(18) = 4.110, p = .002, r = .696$ ]. The visit  $\times$  effort intensity interaction did not reach significance [ $F(3,54) = .668, p = .575, \eta_p^2 = .036$ ]. For the PT (figure 12B), the main effect of effort reached significance [ $F(1.2,22.7) = 44.335, p < .001, \eta_p^2 = .711$ ]. Follow-up test revealed an increase in EMG RMS between light and moderate intensities [ $t(18) = 6.049, p < .001, r = .819$ ]. as well as between the moderate and strong intensities [ $t(18) = 5.566, p < .001, r = .795$ ]. The increase in EMG RMS between the strong and very strong intensities reached significance [ $t(18) = 5.202, p < .001, r = .775$ ]. The main effect of visit did not reach significance [ $F(1,18) = .247, p = .625, \eta_p^2 = .013$ ]. The visit  $\times$  effort intensity interaction did not reach significance [ $F(1.7,30.8) = .873, p = .412, \eta_p^2 = .046$ ].

**Heart rate frequency:** For the BBT (figure 11C), the main effect of visit reached significance [ $F(1,10) = 9.970, p = .010, \eta_p^2 = .499$ ]. Follow-up test revealed an increase in heart rate frequency between the moderate and strong intensities [ $t(17) = 3.176, p = .017, r = .610$ ]. The increase in heart rate frequency between the light and moderate intensities did not reach significance [ $t(17) = 1.490, p = .464, r = .340$ ]. The increase in heart rate frequency between the strong and very strong intensities did not reach significance [ $t(17) = 0.334, p = 1.000, r = .081$ ]. The main effect of effort intensity did not reach significance [ $F(3,30) = 1.976, p = .139, \eta_p^2 = .165$ ]. The visit  $\times$  effort intensity interaction did not reach significance [ $F(1.6,16.3) = 3.688, p = .055, \eta_p^2 = .269$ ]. For the PT (figure 12C), the main effect of effort reached significance [ $F(3,42) = 14.804, p < .001, \eta_p^2 = .513$ ]. Follow-up test revealed an increase in heart rate frequency between the moderate and strong intensities [ $t(19) = 3.285, p = .012, r = .602$ ]. The increase in heart rate frequency between the light

and moderate intensities did not reach significance [ $t(19) = 2.182, p = .126, r = .448$ ]. The increase in heart rate frequency between the strong and very strong intensities did not reach significance [ $t(19) = 1.941, p = .202, r = .407$ ]. The main effect of visit did not reach significance [ $F(1,14) = .218, p = .647, \eta_p^2 = .015$ ]. The visit  $\times$  effort intensity interaction did not reach significance [ $F(3,42) = .406, p = .748, \eta_p^2 = .028$ ].

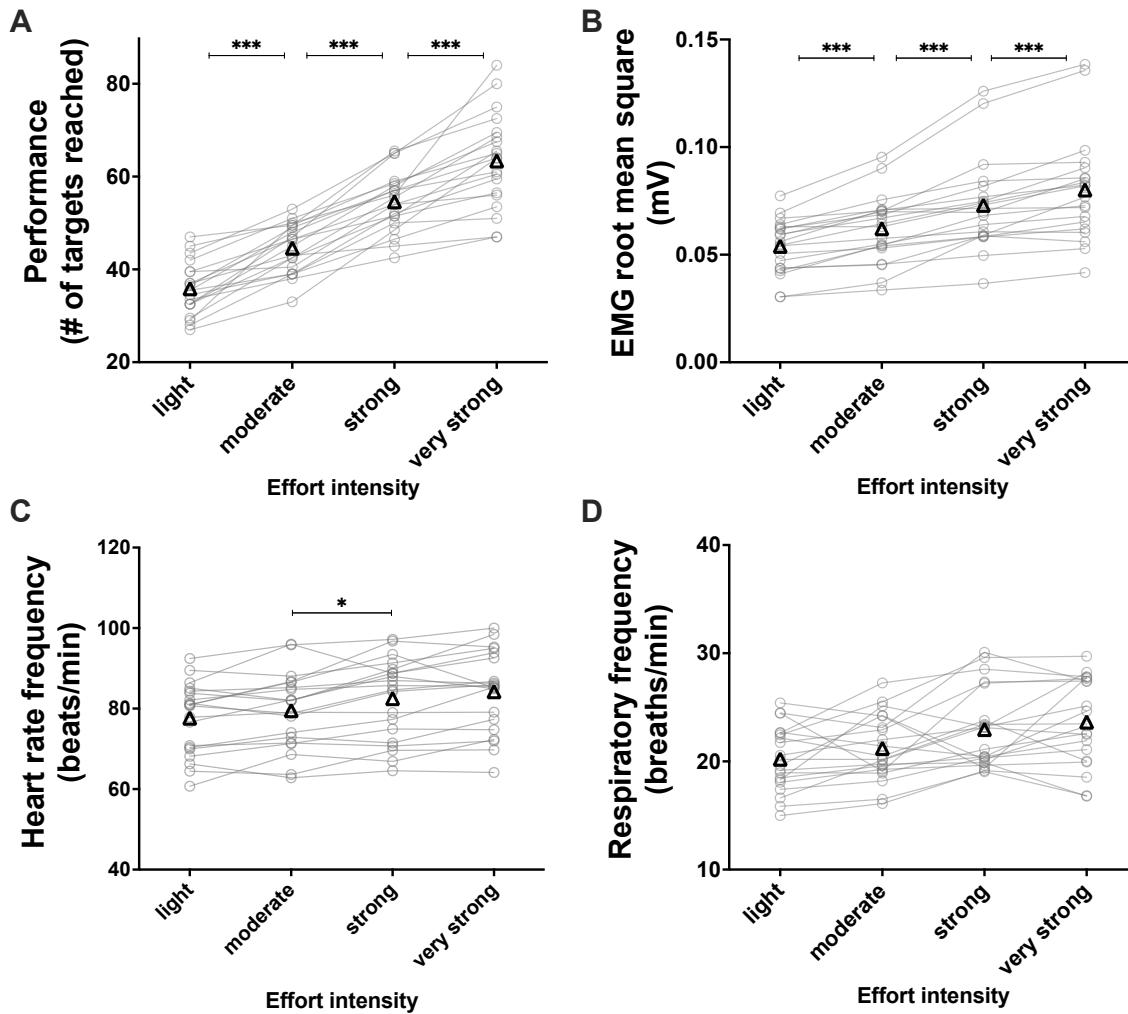
**Respiratory frequency:** For the BBT (figure 11D), the main effect of visit did not reach significance [ $F(1,13) = .008, p = .930, \eta_p^2 = .001$ ]. The main effect of effort intensity reached significance [ $F(3,39) = 6.463, p = .001, \eta_p^2 = .332$ ]. The increase in respiratory frequency between the light and moderate intensities did not reach significance [ $t(19) = 2.450, p = .072, r = .490$ ]. There was no difference in respiratory frequency between the moderate and strong intensities [ $t(19) = 2.131, p = .139, r = .439$ ] nor between the strong and very strong intensities [ $t(19) = 1.663, p = .338, r = .357$ ]. The visit  $\times$  effort intensity interaction did not reach significance [ $F(3,39) = .084, p = .970, \eta_p^2 = .006$ ]. For the PT (figure 12D), the main effect of visit did not reach significance [ $F(1,15) = .142, p = .711, \eta_p^2 = .009$ ]. The main effect of effort intensity reached significance [ $F(3,45) = 10.893, p < .001, \eta_p^2 = .421$ ]. The increase in respiratory frequency between the light and moderate intensities did not reach significance [ $t(19) = 1.648, p = .347, r = .354$ ]. There was no difference in respiratory frequency between the moderate and strong intensities [ $t(19) = 2.451, p = .072, r = .490$ ] nor between the strong and very strong intensities [ $t(19) = 1.052, p = .917, r = .235$ ]. The visit  $\times$  effort intensity interaction did not reach significance [ $F(3,45) = .195, p = .899, \eta_p^2 = .012$ ].





**Figure 11. Experiment 1: using the perception of effort to prescribe the exercise during the Box and Block test.**

Effect of increasing the prescribed effort intensity on performance (panel A, N = 20), EMG root mean square of the sum of the biceps and triceps brachial muscles (panel B, n = 19), heart rate frequency (panel C, n = 18) and respiratory frequency (panel D, N = 20). The exercise was prescribed at four intensities of perceived effort via the CR100 scale: light (13/100), moderate (23/100), strong (50/100), very strong (70/100). Data are presented as the main effect of effort intensity. Individual data are presented in grey circles and means in black triangles. \* difference between two intensities of effort. One symbol for  $p < 0.05$ , two symbols for  $p < 0.01$  and three symbols for  $p < 0.001$ .



**Figure 12. Experiment 1: using the perception of effort to prescribe the exercise during the Pointing task.**

Effect of increasing the prescribed effort intensity on performance (panel A, N = 20), EMG root mean square of the sum of the biceps and triceps brachial muscles (panel B, N = 20), heart rate frequency (panel C, N = 20) and respiratory frequency (panel D, N = 20) during the Pointing Task. The exercise was prescribed at four intensities of perceived effort via the CR100 scale: light (13/100), moderate (23/100), strong (50/100), very strong (70/100). Data are presented as the main effect of effort intensity. Individual data are presented in grey circles and means in black triangles. \* difference between two intensities of effort. One symbol for  $p < 0.05$ , two symbols for  $p < 0.01$  and three symbols for  $p < 0.001$ .

**b. Manipulating the tempo to alter task difficulty.**

Results for the BBT and PT during the tempo sessions are presented in figures 13 and 14, respectively.

**Performance:** For the BBT (figure 13A), manipulation of the tempo increased performance [ $\chi^2(2) = 40, p < .001$ ]. Performance increased between the easy and medium difficulties ( $Z = 3.990, p < .001, r = .631$ ) as well as between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.935, p < .001, r = .622$ ). Performance increased between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.941, p < .001, r = .623$ ). For the PT (figure 14A), manipulation of the tempo increased performance [ $\chi^2(2) = 40, p < .001$ ]. Performance increased between the easy and medium difficulties easy ( $Z = 3.965, p < .001, r = .627$ ) as well as between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.941, p < .001, r = .623$ ). Performance increased between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.932, p < .001, r = .622$ ).

**Perception of effort:** For the BBT (figure 13B), manipulation of the tempo increased the rating of perceived effort [ $\chi^2(2) = 30.152, p < .001$ ]. Rating of perceived effort increased between the easy and medium difficulties ( $Z = 3.747, p = .001, r = .592$ ) as well as between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.790, p < .001, r = .599$ ). Rating of perceived effort increased between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.460, p = .002, r = .547$ ). For the PT (figure 14B), manipulation of the tempo increased the rating of perceived effort [ $\chi^2(2) = 36.1, p < .001$ ]. Rating of perceived effort increased between the easy and medium difficulties ( $Z = 3.865, p < .001, r = .611$ ) as well as between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.921, p < .001, r = .620$ ). Rating of perceived effort increased between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.883, p < .001, r = .614$ ).

**EMG RMS:** For the BBT (figure 13C), manipulation of the tempo increased the EMG RMS [ $\chi^2(2) = 27.9, p < .001$ ]. EMG RMS increased between the easy and medium difficulties ( $Z = 3.285, p = .003, r = .519$ ) as well as between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.360, p = .002, r = .531$ ). EMG RMS increased between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.024, p = .007, r = .478$ ). For the PT (figure 14C), manipulation of the

tempo increased the EMG RMS [ $\chi^2(2) = 40, p < .001$ ]. EMG RMS increased between the easy and medium difficulties ( $Z = 3.920, p < .001, r = .620$ ) as well as between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.920, p < .001, r = .620$ ). EMG RMS increased between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.920, p < .001, r = .620$ ).

**Heart rate frequency:** Despite controlling for movement artifacts data was lost in two participants during the BBT and two participants during the PT, both during the completion of the hard difficulty. For the BBT (figure 13D), manipulation of the tempo increased the heart rate frequency [ $F(2,34) = 9.826, p < .001, \eta_p^2 = .366$ ]. Heart rate frequency increased between the easy and medium difficulties [ $t(19) = 2.517, p < .001, r = .500$ ] as well as between the easy and hard difficulties [ $t(17) = 3.861, p < .001, r = .684$ ]. Heart rate frequency increased between the medium and hard difficulties [ $t(17) = 2.297, p < .001, r = .487$ ]. For the PT (figure 14D), manipulation of the tempo increased the heart rate frequency [ $F(2,34) = 15.707, p < .001, \eta_p^2 = .480$ ]. Heart rate frequency increased between the easy and medium difficulties [ $t(19) = 2.707, p = .042, r = .528$ ] as well as between the easy and hard difficulties [ $t(17) = 4.911, p < .001, r = .766$ ]. Heart rate frequency increased between the medium and hard difficulties [ $t(17) = 3.604, p = .007, r = .658$ ].

**Respiratory frequency:** For the BBT (figure 13E), manipulation of the tempo increased the respiratory frequency [ $F(2,38) = 10.5, p < .001, \eta_p^2 = .355$ ]. The increase in respiratory frequency between the easy and medium difficulties did not reach significance [ $t(19) = 2.373, p = .085, r = .478$ ]. Respiratory frequency increased between the easy and hard difficulties [ $t(19) = 3.797, p = .004, r = .657$ ] as well as between the medium and hard difficulties [ $t(19) = 2.8, p = .036, r = .537$ ]. For the PT (figure 14E), manipulation of the tempo increased the respiratory frequency [ $F(2,38) = 5.3, p = .009, \eta_p^2 = .219$ ]. Respiratory frequency increased between the medium and hard difficulties [ $t(19) = 3.380, p = .009, r = .613$ ]. The increase in respiratory frequency between the easy and hard difficulties did not reach significance [ $t(19) = 2.391, p = .082, r = .481$ ]. There was no difference in respiratory frequency between the easy and medium difficulties [ $t(19) = .184, p = 1.000, r = .042$ ].

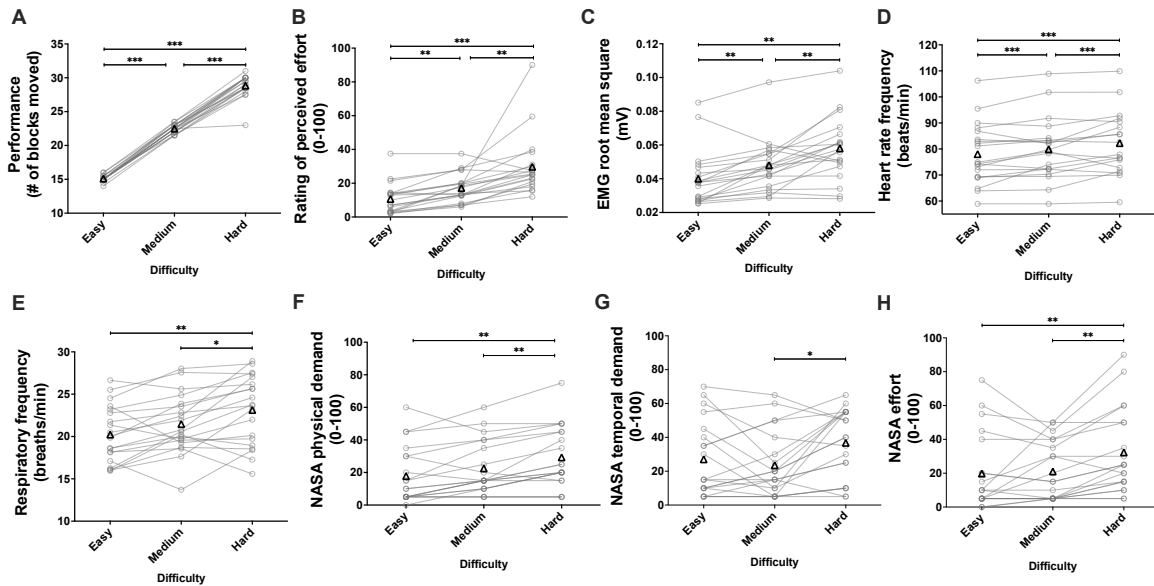
**NASA TLX scale, physical demand:** For the BBT (figure 13F), manipulation of the tempo increased the physical demand score [ $\chi^2(2) = 17.815, p < .001$ ]. The increase in physical demand score between the easy and medium difficulties did not reach significance ( $Z = 2.213, p = .081, r = .350$ ). Physical demand score increased between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.307, p = .003, r = .523$ ) as well as between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.051, p = .007, r = .482$ ). For the PT (figure 14F), manipulation of the tempo increased the physical demand score [ $\chi^2(2) = 14.464, p = .001$ ]. Physical demand score did not increase between the easy and medium difficulties ( $Z = 1.690, p = .273, r = .267$ ). Physical demand score increased between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.354, p = .002, r = .530$ ) as well as between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.066, p = .007, r = .485$ ).

**NASA TLX scale, temporal demand:** For the BBT (figure 13G), manipulation of the tempo increased the temporal demand score [ $\chi^2(2) = 7.28, p = .026$ ]. Temporal demand score did not increase between the easy and medium difficulties ( $Z = .572, p = 1.000, r = .090$ ). The increase in temporal demand score between the easy and hard difficulties did not reach significance ( $Z = 2.194, p = .085, r = .347$ ). Temporal demand score increased between the medium and hard difficulties ( $Z = 2.686, p = .022, r = .425$ ). For the PT (figure 14G), manipulation of the tempo increased the temporal demand score [ $\chi^2(2) = 23.792, p < .001$ ]. The increase in temporal demand score between the easy and medium difficulties did not reach significance ( $Z = 2.144, p = .096, r = .339$ ). Temporal demand score increased between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.712, p = .001, r = .587$ ) as well as between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.736, p = .001, r = .591$ ).

**NASA TLX scale, effort:** For the BBT (figure 13H), manipulation of the tempo increased the effort score [ $\chi^2(2) = 18.123, p < .001$ ]. Effort score did not increase between the easy and medium difficulties ( $Z = .177, p = 1.000, r = .028$ ). Effort score increased between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.184, p = .004, r = .503$ ), as well as between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.202, p = .004, r = .506$ ). For the PT (figure 14H), manipulation of the tempo increased the effort score demand score [ $\chi^2(2) = 22.776, p < .001$ ]. Effort score did not increase between the easy and medium difficulties ( $Z = 1.759,$

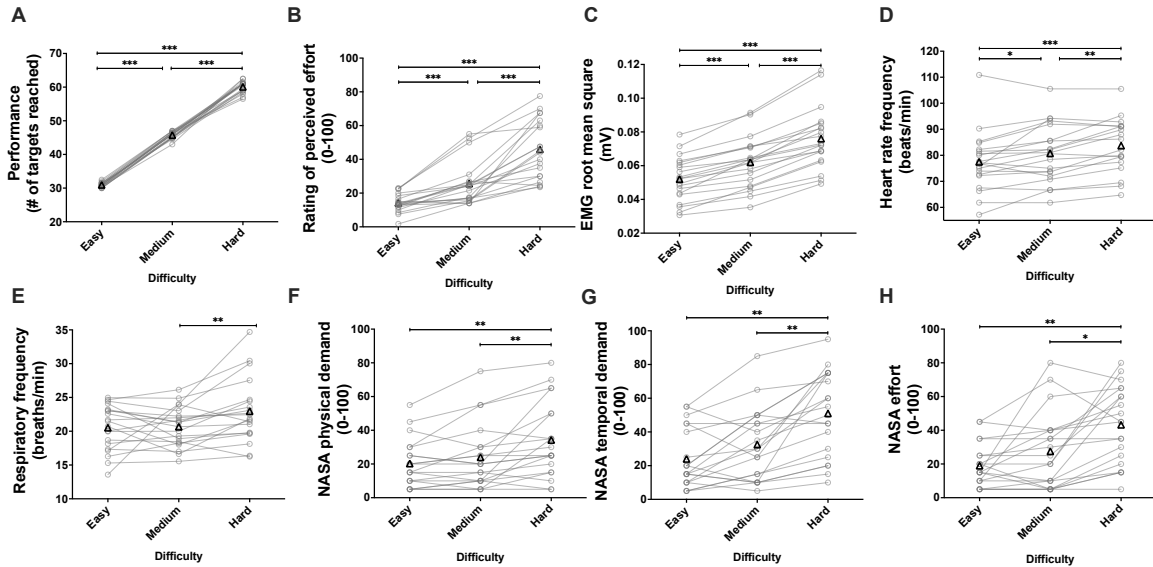
$p = .236$ ,  $r = .278$ ). Effort score increased between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.637$ ,  $p = .001$ ,  $r = .575$ ), as well as between the medium and hard difficulties ( $Z = 2.882$ ,  $p = .012$ ,  $r = .456$ ).

**VAS fatigue:** Feelings of fatigue did not increase during the tempo session (from  $2.9 \pm 2.2$  to  $3.2 \pm 1.9$ ;  $Z = .952$ ,  $p = .340$ ).



**Figure 13. Experiment 1: Manipulating the tempo to alter task difficulty during the Box and block test.**

Effect of prescribing effort on performance (panel A,  $N = 20$ ), Rating of perceived effort (RPE ; panel B,  $N = 20$ ), EMG root mean square of the sum of the biceps and triceps brachial muscles (panel C,  $N = 20$ ), heart rate frequency (panel D,  $n = 18$ ), respiratory frequency (panel E,  $N = 20$ ) and NASA TLX scores for physical demand (panel F,  $N = 20$ ), temporal demand (panel G,  $N = 20$ ) and effort (panel H,  $N = 20$ ). For the easy difficulty, a 0.5 Hz tempo was imposed. For the medium difficulty, a 0.75 Hz tempo was imposed. For the hard difficulty, a 1 Hz tempo was imposed. Data are presented as the main effect of effort intensity. Individual data are presented in grey circles and means in black triangles. \* difference between two intensities of effort. One symbol for  $p < 0.05$ , two symbols for  $p < 0.01$  and three symbols for  $p < 0.001$ .



**Figure 14. Experiment 1: Manipulating the tempo to alter task difficulty during the Pointing task.**

Effect of prescribing effort on performance (panel A, N = 20), Rating of perceived effort (RPE, panel B, N = 20), EMG root mean square of the sum of the biceps and triceps brachial muscles (panel C, N = 20), heart rate frequency (panel D, n = 18), respiratory frequency (panel E, N = 20) and NASA TLX scores for physical demand (panel F, N = 20), temporal demand (panel G, N = 20) and effort (panel H, N = 20). For the easy difficulty, a 1 Hz tempo was imposed. For the medium difficulty, a 1.5 Hz tempo was imposed. For the hard difficulty, a 2 Hz tempo was imposed. Data are presented as the main effect of difficulty. Individual data are presented in grey circles and means in black triangles. \* difference between two intensities of effort. One symbol for  $p < 0.05$ , two symbols for  $p < 0.01$  and three symbols for  $p < 0.001$ .

### c. Adding weight on the forearm to alter task difficulty

Results for the BBT and PT during the weight sessions are presented in figures 15 and 16, respectively.

**Performance:** For the BBT (figure 15A) and PT (figure 16A), manipulation of the weight did not alter performance [ $\chi^2(2) = 4.899$ ,  $p = .086$ ] and [ $\chi^2(2) = 2.032$ ,  $p = .361$ ], respectively.

**Perception of effort:** For the BBT (figure 15B), manipulation of the weight increased the rating of perceived effort [ $\chi^2(2) = 36.026$ ,  $p < .001$ ]. Rating of perceived effort

increased between the easy and medium difficulties ( $Z = 3.341, p = .003, r = .528$ ) as well as between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.921, p < .001, r = .620$ ). Rating of perceived effort increased between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.624, p = .001, r = .573$ ). For the PT (figure 16B), manipulation of the weight increased the rating of perceived effort [ $\chi^2(2) = 32.076, p < .001$ ]. Rating of perceived effort increased between the easy and medium difficulties ( $Z = 3.324, p = .003, r = .526$ ) as well as between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.920, p < .001, r = .620$ ). Rating of perceived effort increased between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.502, p = .001, r = .554$ ).

**Heart rate frequency:** Despite controlling for movement artifacts data was lost during the BBT in four participants during the completion of the medium difficulty and in one participant during the completion of the hard difficulty. During the PT, data was lost in two participants during the completion of the easy difficulty, in one participant during the completion of the medium difficulty and in one participant during the completion of the hard difficulty. For the BBT (figure 15C), manipulation of the weight increased the heart rate frequency [ $F(2,30) = 13.758, p < .001, \eta_p^2 = .478$ ]. Heart rate frequency did not increase between the easy and medium difficulties [ $t(15) = .748, p = 1.000, r = .190$ ]. Heart rate frequency increased between the easy and hard difficulties [ $t(15) = 4.213, p = .002, r = .736$ ], as well as between the medium and hard difficulties [ $t(15) = 5.115, p < .001, r = .797$ ]. For the PT (figure 16C), manipulation of the weight increased the heart rate frequency [ $F(2,32) = 11.257, p < .001, \eta_p^2 = .413$ ]. The increase in heart rate frequency between the easy and medium difficulties [ $t(16) = 2.636, p = .054, r = .550$ ] as well as between the medium and hard difficulties [ $t(16) = 2.541, p = .065, r = .536$ ] did not reach significance. Heart rate frequency increased between the easy and hard difficulties [ $t(16) = 4.190, p = .002, r = .723$ ].

**EMG RMS:** For the BBT (figure 15D), manipulation of the weight increased the EMG RMS [ $\chi^2(2) = 31.3, p < .001$ ]. EMG RMS increased between the easy and medium difficulties ( $Z = 2.987, p = .008, r = .472$ ) as well as between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.323, p = .003, r = .525$ ). EMG RMS increased between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.920, p < .001, r = .620$ ). For the PT (figure 16D), manipulation of the



weight increased the EMG RMS [ $\chi^2(2) = 14.8, p = .001$ ]. EMG RMS did not increase between the easy and medium difficulties ( $Z = .000, p = 1.000, r = 0$ ). EMG RMS increased between the easy and hard difficulties ( $Z = 2.061, p = .007, r = .326$ ), as well as between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.285, p = .003, r = .519$ ).

**Respiratory frequency:** During the BBT, data was lost in one participant during the completion of both the easy and hard difficulties. During the PT, data was lost in one participant for the three difficulties and in one participant during the hard difficulty. For the BBT (figure 15E) and PT (figure 16E), manipulation of the weight did not alter respiratory frequency [ $F(2,36) = 1.931, p = .159, \eta_p^2 = .097$ ] and [ $F(2,34) = 1.477, p = .243, \eta_p^2 = .080$ ], respectively.

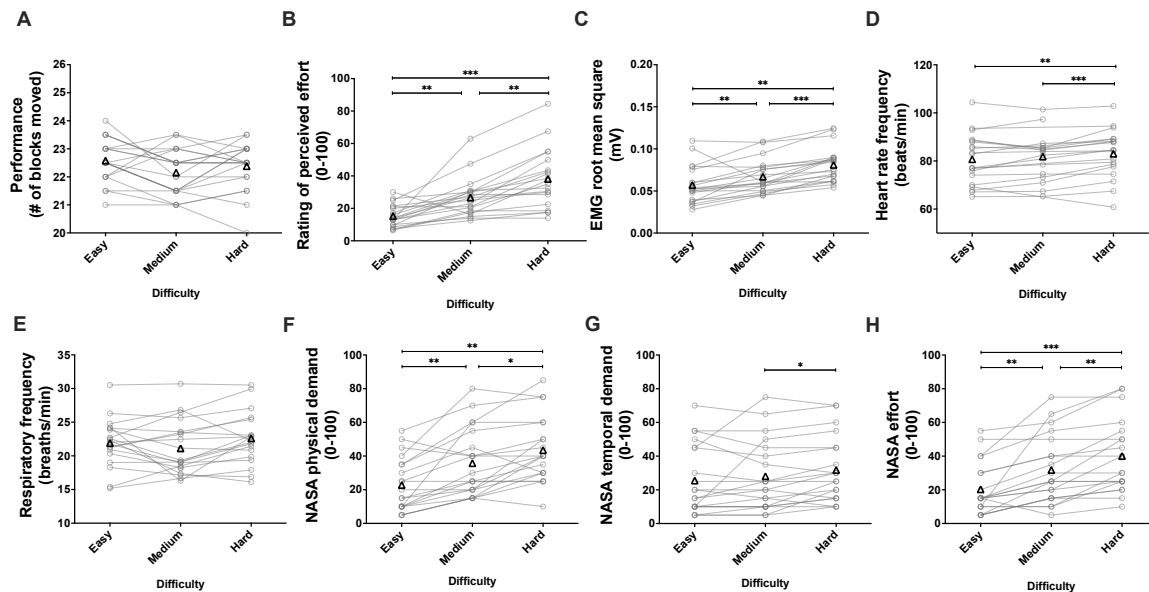
**NASA TLX scale, physical demand:** For the BBT (figure 15F), manipulation of the weight increased the physical demand score [ $\chi^2(2) = 18.2, p < .001$ ]. Physical demand score increased between the easy and medium difficulties ( $Z = 3.373, p = .002, r = .533$ ) as well as between the medium and hard difficulties ( $Z = 2.630, p = .026, r = .416$ ). Physical demand score also increased between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.497, p = .001, r = .553$ ). For the PT (figure 16F), manipulation of the weight increased the physical demand score [ $\chi^2(2) = 35.351, p < .001$ ]. Physical demand score increased between the easy and medium difficulties ( $Z = 3.218, p = .004, r = .509$ ) as well as between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.734, p = .001, r = .590$ ). Physical demand score also increased between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.930, p < .001, r = .621$ ).

**NASA TLX scale, temporal demand:** For the BBT (figure 15G), manipulation of the weight increased the temporal demand score [ $\chi^2(2) = 7, p = .031$ ]. Temporal demand score did not increase between the easy and medium difficulties ( $Z = .361, p = 1.000, r = .057$ ) as well as between the easy and hard difficulty ( $Z = 1.934, p = .159, r = .306$ ). Temporal demand score increased between the medium and hard difficulty ( $Z = 2.423, p = .046, r = .383$ ). For the PT (figure 16G), manipulation of the weight increased the temporal demand score [ $\chi^2(2) = 8.222, p = .016$ ]. Temporal demand score did not increase between the easy and medium difficulties ( $Z = 2.042, p = .123, r = .323$ ) as well as between the medium and

hard difficulties ( $Z = 2.110$ ,  $p = .105$ ,  $r = .334$ ). Temporal demand score increased between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.086$ ,  $p = .006$ ,  $r = .488$ ).

**NASA TLX scale, effort:** For the BBT (figure 15H), manipulation of the tempo increased the effort score [ $\chi^2(2) = 28.353$ ,  $p < .001$ ]. Effort score increased between the easy and medium difficulties ( $Z = 3.309$ ,  $p = .003$ ,  $r = .523$ ), as well as between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.225$ ,  $p = .004$ ,  $r = .510$ ). Effort score increased between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.798$ ,  $p < .001$ ,  $r = .601$ ). For the PT (figure 16H), manipulation of the tempo increased the effort score [ $\chi^2(2) = 25.507$ ,  $p < .001$ ]. Effort score did not increase between the easy and medium difficulties ( $Z = 1.720$ ,  $p = .256$ ,  $r = .272$ ). Effort score increased between the medium and hard difficulties ( $Z = 3.362$ ,  $p = .002$ ,  $r = .532$ ), as well as between the easy and hard difficulties ( $Z = 3.604$ ,  $p = .001$ ,  $r = .570$ ).

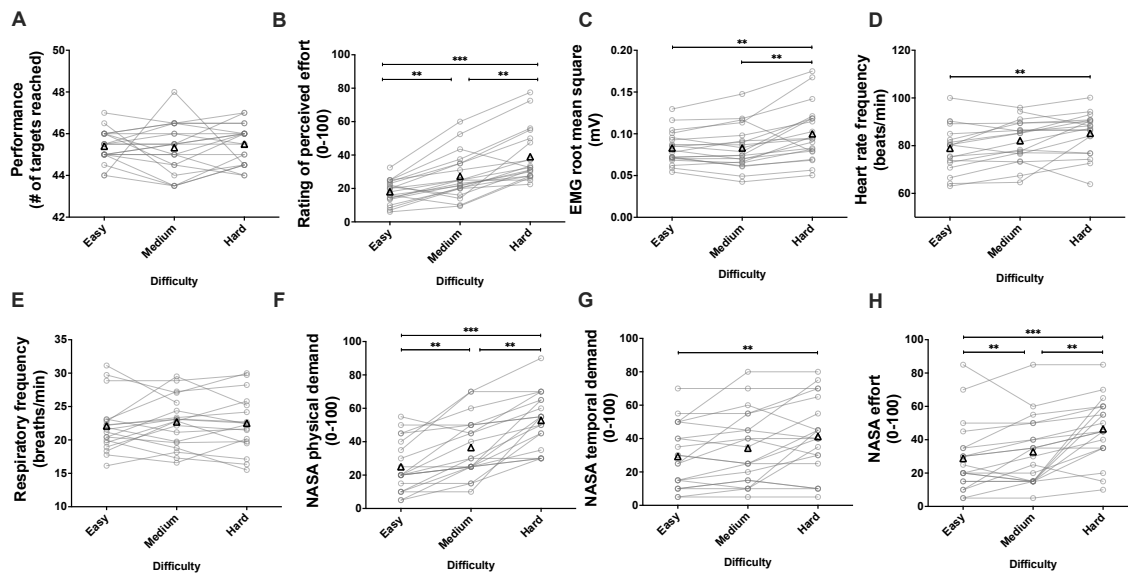
**VAS fatigue:** Feelings of fatigue increased during the tempo session (from  $3.1 \pm 2.3$  to  $3.9 \pm 1.9$ ;  $Z = 2.315$ ,  $p = .021$ ).



**Figure 15. Experiment 1: Adding weight on the forearm to alter task difficulty during the Box and Block test.**

Effect of manipulating the weight during the Box and Block Test on performance (panel A,  $N = 20$ ), Rating of perceived effort (panel B,  $N = 20$ ), EMG root mean square of the

sum of the biceps and triceps brachial muscles (panel C, N = 20), heart rate frequency (panel D, n = 16), respiratory frequency (panel E, N = 20) and NASA TLX scores for the physical demand (panel F, N = 20), the temporal demand (panel G, N = 20) and effort (panel H, N = 20). Movements were performed at a fixed tempo of 0.75 Hz. For the easy difficulty, no additional weight on the forearm was added. For the medium difficulty, a weight of 0.5 kg was added. For the hard difficulty, a weight of 1kg was added. Data are presented as the main effect of difficulty. Individual data are presented in grey circles and means in black triangles. \* difference between two intensities of effort. One symbol for  $p < 0.05$ , two symbols for  $p < 0.01$  and three symbols for  $p < 0.001$ .



**Figure 16. Experiment 1: Adding weight on the forearm to alter task difficulty during the Pointing Task.**

Effect of manipulating the weight during the Pointing Task on performance (panel A, N = 20), Rating of perceived effort (panel B, N = 20), EMG root mean square of the sum of the biceps and triceps brachial muscles (panel C, N = 20), heart rate frequency (panel D, n = 17), respiratory frequency (panel E, N = 20) and NASA TLX scores for the physical demand (panel F, N = 20), the temporal demand (panel G, N = 20) and effort (panel H, N = 20). Movements were performed at a fixed tempo of 1.5 Hz. For the easy difficulty, no additional weight on the forearm was added. For the medium difficulty, a weight of 0.5 kg was added. For the hard difficulty, a weight of 1kg was added. Data are presented as the main effect of difficulty. Individual data are presented in grey circles and means in black triangles. \* difference between two intensities of effort. One symbol for  $p < 0.05$ , two symbols for  $p < 0.01$  and three symbols for  $p < 0.001$ .

## 2. Experiment 2

In this experiment, participants visited the laboratory once. First, we prescribed 30 s of exercise with the BBT performed at four intensities of effort (light, moderate, strong and very strong). Performance, EMG RMS and heart rate frequency were monitored for each prescribed effort intensity. Then, we manipulated task difficulty (easy, hard) by adding two different weights on the participant's dominant forearm while performing the standardized 60 s BBT. Each difficulty was repeated twice. Performance, EMG, heart rate frequency and the subjective workload were measured for each repetition of each difficulty.

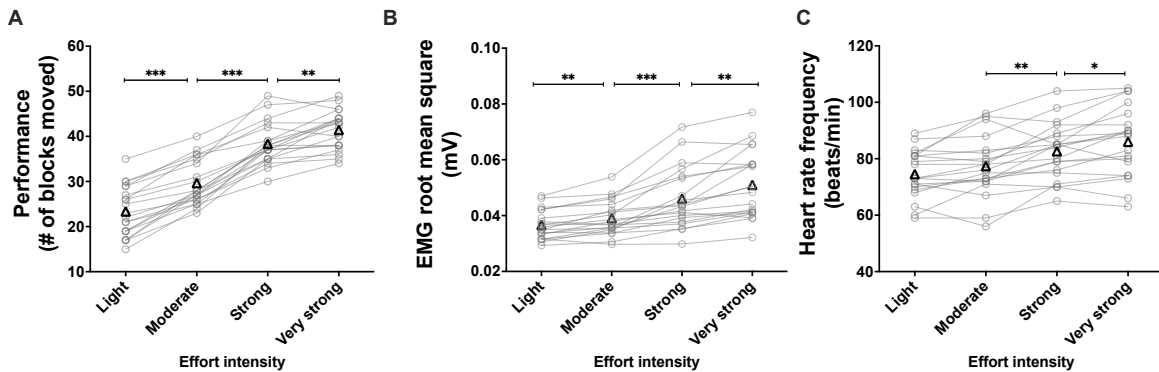
### a. Using the perception of effort to prescribe the exercise

Results are presented in figure 17.

**Performance:** Increasing the prescribed effort intensity resulted in an increased performance [ $F(1.7, 31.6) = 168.560, p < .001, \eta_p^2 = .899$ ; figure 17A]. Performance increased between the light and moderate effort intensities [ $t(19) = 11.393, p < .001, r = .934$ ], moderate and strong effort intensities [ $t(19) = 12.564, p < .001, r = .945$ ], as well as between strong and very strong effort intensities [ $t(19) = 4.258, p = .001, r = .699$ ].

**Heart rate frequency:** Increasing the prescribed effort intensity resulted in an increased heart rate [ $F(3,57) = 29.074, p < .001, \eta_p^2 = .605$ ; figure 17B]. The increase in heart rate frequency between the light and moderate effort intensities did not reach significance [ $t(19) = 2.316, p = .096, r = .469$ ]. Heart rate frequency increased between the moderate and strong difficulty [ $t(19) = 4.027, p = .002, r = .679$ ], as well as between strong and very strong effort intensities [ $t(19) = 2.925, p = .026, r = .557$ ].

**EMG RMS:** Increasing the prescribed effort intensity resulted in an increased EMG RMS [ $F(1.4, 26.8) = 36.901, p < .001, \eta_p^2 = .660$ ; figure 17C]. EMG RMS increased between the light and moderate intensities [ $t(19) = 4.476, p = .001, r = .716$ ], moderate and strong effort intensities [ $t(19) = 5.233, p < .001, r = .768$ ], as well as between strong and very strong effort intensities [ $t(19) = 4.310, p = .001, r = .703$ ].



**Figure 17. Experiment 2: using the perception of effort to prescribe the exercise during the Box and Block test.**

Effect of increasing the prescribed intensity of effort on performance (panel A,  $N = 20$ ), EMG root mean square of the sum of the biceps and triceps brachial muscles (panel B,  $N = 20$ ), heart rate frequency (panel C,  $N = 20$ ) during the Box and Block Test. The exercise was prescribed at four intensities of perceived effort via the CR100 scale: light (13/100), moderate (23/100), strong (50/100), very strong (70/100). Data are presented as the main effect of effort intensity. Individual data are presented in grey circles and means in black triangles. \* difference between two intensities of effort. One symbol for  $p < 0.05$ , two symbols for  $p < 0.01$  and three symbols for  $p < 0.001$ .

**b. Effects of adding weight on the forearm when completing the Box and Block test with the standardized instructions.**

Results of the main effects of difficulty are presented in figure 18.

**Performance:** Main effect of repetition revealed a greater performance in the second repetition compared to the first repetition [ $F(1, 19) = 34.836, p < .001, \eta_p^2 = .647$ ]. Main effect of difficulty did not reach significance [ $F(1,19) = 1.867, p = .188, \eta_p^2 = .090$ ; figure 18A]. The repetition  $\times$  difficulty interaction reached significance [ $F(1, 19) = 5.166, p =$

.035,  $\eta_p^2 = .214$ ]. Follow-up tests revealed an increased performance between the first and second repetitions for both the easy (from  $84.3 \pm 6.6$  to  $89.7 \pm 8.0$ ; [ $t(19) = 5.219$ ,  $p < .001$ ,  $r = .768$ ]) and hard (from  $84.0 \pm 7.0$  to  $86.8 \pm 6.9$ ; [ $t(19) = 3.667$ ,  $p = .005$ ,  $r = .644$ ]) difficulties. Performance did not differ for the first repetition between the easy and hard difficulties ( $84.3 \pm 6.6$  and  $84.0 \pm 7.0$ ; [ $t(19) = .188$ ,  $p = 1.000$ ,  $r = .043$ ]). The higher performance observed for the second repetition in the easy difficulty compared to the hard difficulty did not reach significance ( $89.7 \pm 8.0$  and  $86.8 \pm 6.9$ ; [ $t(19) = 2.316$ ,  $p = .096$ ,  $r = .469$ ]).

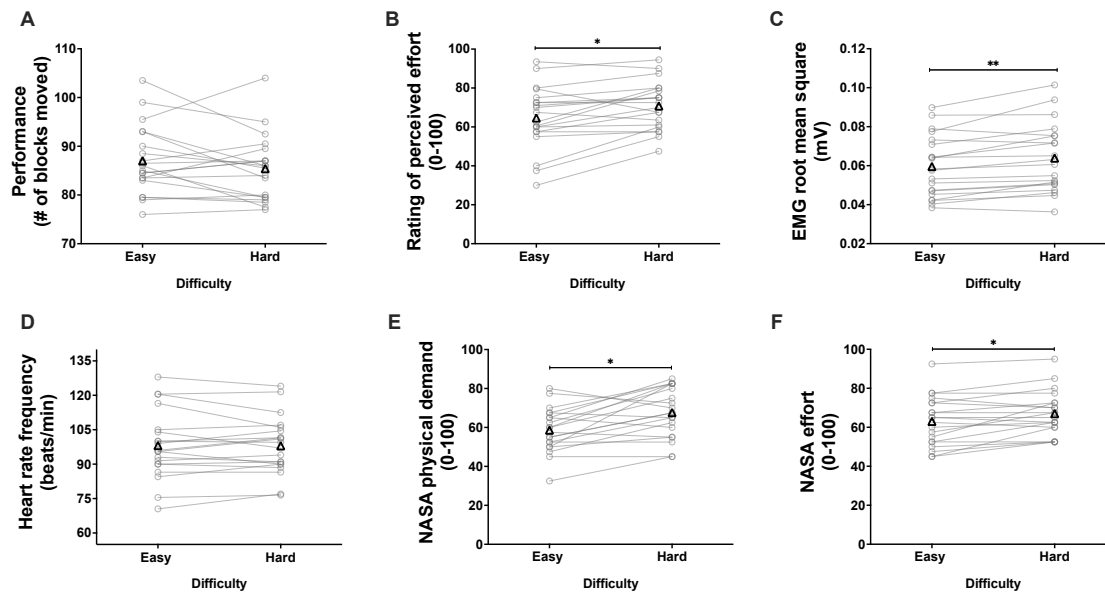
**Perception of effort:** Main effect of repetition revealed a higher rating of perceived effort in the second repetition compared to the first repetition [ $F(1, 19) = 14.350$ ,  $p < .001$ ,  $\eta_p^2 = .430$ ]. Main effect of difficulty revealed an increase in rating of perceived effort with the increase in difficulty [ $F(1, 19) = 6.779$ ,  $p = .017$ ,  $\eta_p^2 = .263$ ; figure 18B]. The repetition  $\times$  difficulty interaction did not reach significance [ $F(1, 19) = .005$ ,  $p = .946$ ,  $\eta_p^2 < .001$ ].

**Heart rate frequency:** Main effect of repetition [ $F(1, 19) = 1.094$ ,  $p = .309$ ,  $\eta_p^2 = .054$ ], difficulty [ $F(1, 19) = .664$ ,  $p = .425$ ,  $\eta_p^2 = .034$ ; figure 18C] and repetition  $\times$  difficulty interaction [ $F(1, 19) = .492$ ,  $p = .492$ ,  $\eta_p^2 = .025$ ] did not reach significance.

**EMG RMS:** Main effect of repetition revealed a higher EMG RMS in the second repetition compared to the first repetition [ $F(1, 19) = 11.692$ ,  $p = .003$ ,  $\eta_p^2 = .381$ ]. Main effect of difficulty revealed an increase in EMG RMS with the increase in difficulty [ $F(1, 19) = 14.280$ ,  $p < .001$ ,  $\eta_p^2 = .429$ ; figure 18D]. The repetition  $\times$  difficulty interaction did not reach significance [ $F(1, 19) = .002$ ,  $p = .964$ ,  $\eta_p^2 < .001$ ].

**NASA TLX scale, physical demand:** Main effect of repetition revealed a higher physical demand score in the second repetition compared to the first repetition [ $F(1, 19) = 20.328$ ,  $p < .001$ ,  $\eta_p^2 = .517$ ]. Main effect of difficulty revealed an increase in physical demand score with the increase in difficulty [ $F(1, 19) = 13.426$ ,  $p = .002$ ,  $\eta_p^2 = .414$ ; figure 18E]. The repetition  $\times$  difficulty interaction did not reach significance [ $F(1, 19) = 1.342$ ,  $p = .261$ ,  $\eta_p^2 = .066$ ].

**NASA TLX scale, effort:** Main effect of repetition did not reach significance [ $F(1, 19) = 2.664, p = .119, \eta_p^2 = .123$ ]. Main effect of difficulty revealed an increase in effort score with the increase in difficulty [ $F(1, 19) = 8.780, p = .008, \eta_p^2 = .316$ ; figure 18F]. The repetition  $\times$  difficulty interaction did not reach significance [ $F(1, 19) = .039, p = .846, \eta_p^2 = .002$ ].



**Figure 18. Experiment 2: Adding weight on the forearm to alter task difficulty during the Box and Block test with its validated instructions.**

Effect of weight manipulation on performance (panel A, N = 20), rating of perceived effort (panel B, N = 20), EMG root mean square of the sum of the biceps and triceps brachial muscles (panel C, N = 20), heart rate frequency (panel D, N = 20), NASA TLX scores for physical demand (panel E, N = 20) and effort (panel F, N = 20) during the Box and Block Test with its official instructions. Data are presented as the main effect of difficulty. Individual data are presented in grey circles and means in black triangles. \* difference between two intensities of effort. One symbol for  $p < 0.05$ , two symbols for  $p < 0.01$  and three symbols for  $p < 0.001$ .

## Discussion

In this study, we investigated the possibility to prescribe and monitor exercise with the perception of effort during two upper-limb motor tasks: the box and block test and a pointing task. Our results demonstrate that performance in both tasks increased when the

perception of effort intensity used to prescribe the exercise increased. When the task difficulty was altered by manipulating the physical demand via different tempos or weight added on the forearm, our results demonstrate that perception of effort increased when task difficulty increased. This increased perception of effort was observed during both the modified version of the box and block test as well as the pointing task performed in experiment 1. Finally, when completing in experiment 2 the standardized version of the box and block test in the absence and presence of additional weight on the forearm, we observed a maintained performance at a cost of a higher perception of effort. By integrating the results of the two experiments, our results suggest that perception of effort can be efficiently used in healthy young adults to prescribe and monitor exercise during upper-limb motor tasks.

*Perception of effort can be used to prescribe the exercise intensity of upper-limb motor tasks.*

Perception of effort is widely used in the field of exercise sciences to prescribe exercise (Borg, 1998; Eston & Parfitt, 2018). As an example, the intensity of perception of effort has been used to prescribe locomotor exercise such as running or cycling (e.g., Christian et al., 2014; Hobbins et al., 2019), and resistance exercise involving the upper and lower limb (e.g., Gearhart et al., 2009; Helms et al., 2017; Zourdos et al., 2016). However, to the best of our knowledge, the possibility to use the intensity of perception of effort for exercise prescription in the context of upper-limb motor tasks remains unclear. To validate this possibility, as the intensity of effort engaged in a task is proposed to determine the performance in this task (Brehm & Self, 1989; Richter et al., 2016), performance should increase when the intensity of perceived effort increases. We tested this possibility in both experiments. In experiment 1, we observed during the box and block test and a pointing task a gradual increase in performance between each intensity of perceived effort used to prescribe the exercise. This observation was subsequently reproduced in experiment 2 with another sample of participants performing the box and block test. Therefore, as previously observed during locomotor exercise or resistance exercise, our results suggest that the intensity of perceived effort could be an efficient tool to prescribe the exercise during upper-limb motor tasks.



To further confirm the possibility to use the perception of effort to prescribe exercise, we also monitored several physiological responses to the task performed: muscle activation, heart rate respiratory frequencies. These physiological responses are known to raise when the intensity of a task is increased during locomotor exercise as well as resistance exercise (de Morree & Marcora, 2010, 2012; Eston & Parfitt, 2018); we therefore hypothesized that the physiological responses would raise with the increased perceived effort intensity. As expected, all physiological parameters were raised with the increased exercise intensity, confirming an increase in physical resources involved in the upper-limb motor tasks performed when the prescribed perceived effort intensity increased. However, it is crucial to note that solely the muscle activation gradually increased between each prescribed perceived effort intensity. In experiment 1, our planned follow-up tests on the main effect of effort intensity failed to reveal a significant increase in respiratory frequency between each intensity. These tests also revealed that heart rate frequency solely increased between the intensities moderate – strong, and not between the intensities light – moderate and strong – very strong. As upper-limb motor tasks involve a lower muscle mass than locomotor exercise or resistance exercise and increasing the muscle mass involved in a task is known to increase cardiorespiratory responses to the exercise (Amann et al., 2011; Goodall et al., 2010; Sidhu et al., 2013), the lack of observed increase between intensities in heart rate frequency and respiratory frequency in our study may be due to the low muscle mass involved in the tasks performed. Consequently, to overcome this limit, we used in experiment 2 a chest belt to better control for movement artifact and increasing the quality of our heart rate frequency measurement. Using the chest belt, compared to the finger pulse transducer, allowed us to avoid data loss and capture an increased heart rate frequency between the intensities moderate – strong and strong – very strong, but not between the intensities light – moderate. Consequently, by integrating the two experiments, our results suggest that when prescribing the exercise during upper-limb motor tasks with the intensity of perceived effort, researchers and clinicians should prioritize the use of EMG over heart rate and respiratory frequencies to monitor changes in the physical resources engaged in the task.

*Perception of effort changes with task difficulty manipulated with alterations in the physical demand.*

Perception of effort is not only used to prescribe the exercise, but also to monitor the exercise (Borg, 1998; Eston & Parfitt, 2018). Indeed, the intensity of perception of effort during a motor task has been extensively shown to be responsive to changes in task difficulty imposed by various experimental manipulations. As an example, perception of effort is altered by the intensity of muscle contraction (e.g., de Morree & Marcora, 2010, 2012), the presence of muscle or mental fatigue (e.g., Jacquet et al., 2021; Pageaux & Lepers, 2016; Pageaux & Lepers, 2018) or changes in environmental conditions (e.g., Borg et al., 2018; Girard & Racinais, 2014; Jeffries et al., 2019). In our study, to test the possibility to monitor the exercise during upper-limb motor tasks, we altered task difficulty by manipulating the physical demand of the tasks performed via imposing various movement tempos or adding weight on the forearm. We expected the perception of effort to raise with the task difficulty, regardless of the physical demand manipulation used.

In experiment 1, during the tempo session, we manipulated the task physical demand by imposing three different movement speeds to complete the box and block test and pointing task. The increased number of blocks moved during the box and block test and targets reached during the pointing task confirmed that we were successful in our experimental manipulation. We observed an increased perception of effort between each task difficulty, suggesting the possibility to track changes in task difficulty imposed by changes in movement speed during upper-limb motor tasks. This increased perception of effort was associated with consistent increased muscle activation and heart rate frequency during both tasks. During the weight session, we manipulated the task physical demand by adding weights on the forearm and imposing a single movement tempo to constrain performance across task difficulties. The lack of changes in performance in both tasks across difficulties confirms that we were successful in our experimental manipulation. In line with the motivational intensity theory (Brehm & Self, 1989; Richter et al., 2016), when task difficulty increases, performance could be maintained by increasing the effort invested in the task. This proposed mechanism to maintain performance is verified in our experiment via the increased perception of effort intensity between each task difficulty,

suggesting the possibility to track changes in task difficulty imposed by manipulating the weight of the exercising forearm moved during upper-limb motor tasks. The increased muscle activation and heart rate frequency over task difficulties further support the mechanism proposed by the motivational intensity theory. However, it is important that muscle activation did not increase in the pointing task between the easy – medium difficulties, and solely between the medium – hard difficulties. This lack of changes when increasing the difficulty from no additional weight on the forearm (easy difficulty) to a light additional weight on the forearm (0.5k, medium difficulty) is most likely due to the recruitment of other muscle groups than the elbow flexor-extensors to compensate for this specific increase in difficulty. Therefore, future studies using a pointing task and willing to track changes in muscle activation induced by finely altering the task difficulty should consider monitoring muscle activation of other muscles such as the elbow muscles involved in the task (e.g., deltoid), and not only the elbow flexor-extensors as we did.

In experiment 2, we performed the standardized version of the box and block test by adding a weight on the forearm to increase task difficulty. Neither performance nor movement speed was controlled, the participants had to move as many blocks as possible in 60 s. In this specific experimental paradigm, the motivational intensity theory would predict two possible outcomes (Brehm & Self, 1989; Richter et al., 2016) : i) performance will drop if the increase in task difficulty is beyond the participants capacity, or ii) performance will be maintained if the increase in task difficulty is within the participants capacity, and this maintained performance will be possible at a cost of a higher effort invested in the task. As our participants were young and healthy, and the weight added on the forearm was chosen following pilot experiments aiming to limit the development of fatigue, we expected that our participants would be able to maintain performance by increasing the effort invested in the task. In line with our hypothesis performance did not differ between the easy and hard difficulty, and the maintained performance was associated with an increased rating of perceived effort reported by the participants. This increase in perception of effort was associated with increased muscle activation, as observed in experiment 1 to compensate for the heavier forearm to move during the box and block test.

Interestingly, not all the physiological variables monitored were responsive to changes in task difficulty in both experiments. In experiment 1, the respiratory frequency

did not increase between the difficulties easy – medium in both tasks when the physical demand was manipulated with the tempo, and no main effect of task difficulty was observed on respiratory frequency when the physical demand was manipulated with the addition of weight on the forearm. Regarding heart rate frequency, changes in this variable between each difficulty were consistently observed only when the task difficulty was manipulated with the tempo. Furthermore, the increased perception of effort observed in experiment 2 to maintain performance during the box and block test performed with the standardized instructions did not occur in the presence of increased heart rate frequency. These results extend the previous observation of the lack of changes in heart rate frequency and respiratory frequency when the intensity of perceived effort is used to prescribe the exercise and confirm that neither heart rate nor respiratory frequency can be used as an efficient physiological correlate of perception of effort in the context of upper-limb motor tasks. Additionally, it is important to note that we systematically monitored the perceived workload of each task at each difficulty by using the NASA-TLX scale, a validated tool used to monitor perceived workload in various contexts (Hart, 2006; Hart & Staveland, 1988). While this scale captured most manipulations of the physical demand performed in both experiments, a lack of changes in the physical demand score, temporal demand score or effort score was observed in some experimental conditions. Therefore, our results suggest that monitoring of perception of effort with category ratio scales as we did in this study could be a complementary approach for researchers in human factors interested in capturing fine changes in perceived workload when task difficulty is manipulated.

#### *Integration with the neurophysiology of perception of effort*

While our experiment did not aim to investigate the neurophysiology of perception of effort, the changes (or lack of changes) in the physiological variables monitored during both experiments allow us to reconcile our results with existing theories on the neurophysiology of perception of effort in the context of motor tasks (for review see (for review see de Morree & Marcora, 2015; Pageaux, 2016). In brief, while it exists an ongoing debate on the sensory signal(s) generating perception of effort (Amann & Light, 2014; Broxterman et al., 2018; Marcora, 2009; Pageaux, 2016; Smirmaul, 2014; Steele & Fisher,

2018), accumulating evidence suggest that when effort perception is investigated as a sensation dissociated from other exercise-related sensations (e.g., pain or discomfort), perception of effort is generated by the neuronal process of the corollary discharge associated with the central motor and command and not by afferent feedback from the working muscles and organs (de Morree et al., 2012; de Morree & Marcora, 2015; Marcora, 2009; Pageaux & Gaveau, 2016). Our results reconcile with this corollary discharge model of perception of effort. Indeed, muscle activation measured with EMG is traditionally used as a marker of the central motor command (Carrier et al., 2011; Kozlowski et al., 2021; Thoroughman & Shadmehr, 1999), and among the three physiological variables measured, only muscle activation was able to track the changes in perception of effort across manipulations of task difficulties and prescription of exercise via the intensity of this perception. Furthermore, in line with the corollary discharge model of perception of effort and the traditional use of this perception as a marker of the central motor command (Jacquet et al., 2021; Kjær et al., 1999; Kozlowski et al., 2021; McCloskey et al., 1974; Mitchell et al., 1989; Seed et al., 2019), our results provide intriguing results in support of the monitoring of this perception in various population with impaired motor control such as older adults (Carment et al., 2018), stroke patients (Neva et al., 2019), Parkinson patients (Sacheli et al., 2019) or other populations with neurological disorders. Future studies should replicate our results with such populations and explore how this perception in the context of specific upper-limb motor tasks is impaired in comparison to healthy individuals. Such studies could provide interesting insights into this perception by further validating its use as a marker of the central motor command in various populations, and potentially open new possibilities in rehabilitation and testing of capacities.

### *Limits, perspectives and conclusions*

While our results provide strong support in favor of the use of perception of effort to prescribe and monitor the exercise in the context of upper-limb motor tasks, we have to acknowledge some limitations to be considered for futures studies. Despite our attempt to control for the induction of fatigue, subjective feelings of fatigue slightly increased in the weight session of experiment 1 (+ 0.9 +/- 1.5 on a visual analog scale). However, as the

completion of the box and block test and the pointing task, as well as the difficulties, were randomized, we are confident that this slight increase in fatigue did not impact the validity of our results. Nonetheless, future studies using physical demand manipulations and controlling for the presence of fatigue should consider increasing the recovery period between each task completion. In this study, we focused on the box and block test as well as a pointing task, and our results should be extended to other upper-limb tasks routinely used in research and clinical settings with a stronger focus on manual dexterity such as the Purdue pegboard test (Backman et al., 1992; Shahar et al., 1998) or the Minnesota manual dexterity test (Cederlund, 2009; Lourenção et al., 2005). To conclude, the present study provides strong evidence in favor of the use of the perception of effort to prescribe and monitor the exercise in the context of upper-limb motor tasks. By integrating the results of the two experiments, measurement of muscle activation seems to be the best physiological correlate of perceived effort during upper-limb motor tasks when the physical demand of the task is manipulated. As effort is perceived not only in the physical domain but also in the mental domain (Inzlicht et al., 2018; Pageaux, 2016; Preston, 2009), future studies should test the possibility to extend our results in the context of the manipulation of the mental demand of the physical task performed.

## Author contributions

AC, BP, JG, MPG and PR designed the study. AC, CFB and MPG conducted the experiments. AC, BP, JG and MPG contributed to the data analysis. MP and BP created the figures. MPG created the first draft of the manuscript. All authors edited and/or approved the final version.

## Funding

MP was supported by a MSc scholarship from the Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal (CRIUGM) and internal scholarship from the Université de Montréal. This study has been funded by the grant Programme d'appui à des projets de recherche stratégiques et structurants (PRSS) as well as BP's CRIUGM and Université de Montréal start-up funding.

## Conflict of interest and data availability

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest. Individual data are presented within the manuscript figures.

# III. Conclusion et perspectives

## A. Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons approfondi l'évolution des définitions ainsi que les processus de mesure de la perception de l'effort. En abordant sa neurophysiologie, il paraît évident que la perception de l'effort est bien plus qu'une mesure subjective. Elle est à la croisée des réponses individuelles, intégrant à la fois des facteurs centraux, psychologiques et comportementaux. Cela en fait une variable de choix, à prendre en compte dans différents contextes : recherche comme clinique, performance comme réhabilitation. Finalement, sa pertinence a été investiguée au cours de tâches motrices des membres supérieurs, comme en atteste notre étude.

Précisément, notre étude a permis d'explorer la possibilité de prescrire et de superviser l'exercice en utilisant la perception de l'effort au cours de deux tâches motrices des membres supérieurs : une version modifiée du test du Box and block et une tâche de pointage. Nos résultats mettent en évidence l'augmentation de la performance dans les deux tâches lorsque l'intensité prescrite de perception de l'effort augmente. Nos résultats sont particulièrement intéressants puisqu'ils suggèrent que les participants sont capables d'autoréguler leur effort et d'ajuster leur performance au niveau de perception de l'effort prescrit. Ils valident non seulement la possibilité de monitorer la perception de l'effort lors de tâches motrices des membres supérieurs mais également d'utiliser la perception de l'effort comme outil de prescription d'intensité de l'exercice. Cela pourrait être utile dans un cadre de réadaptation post blessure ou de réhabilitation, comme auprès des personnes ayant survécu à un accident vasculaire cérébrale. D'autre part, la possibilité de prescrire l'intensité de l'exercice avec la perception de l'effort au cours de tâches motrices des membres supérieurs est intéressante dans une perspective de vieillissement. En effet, la dextérité manuelle étant altérée avec l'âge (Carment et al., 2018), ces résultats sont prometteurs dans l'évaluation et la réadaptation de la dextérité manuelle des aînés. D'autre part, la manipulation de la demande physique des tâches via un tempo ou un poids ajouté à l'avant-bras dominant montre que la perception de l'effort augmente avec la difficulté de la tâche. Cette augmentation s'observe à la fois au cours de la version modifiée du test du



Box and Block mais aussi de la tâche de pointage dans l'expérience 1. Dans l'expérience 2, l'exécution du test du Box and Block avec ses instructions officielles en présence ou en absence de poids additionnel sur l'avant-bras dominant suggère un maintien de la performance au prix d'une perception de l'effort plus élevée. Lorsque ces résultats sont pris dans leur ensemble, ils suggèrent que la perception de l'effort peut être utilisée chez des individus jeunes et en santé pour prescrire et superviser l'exercice au cours de tâches motrices des membres supérieurs.

## B. Perspectives : manipulation de la demande mentale

L'effort étant présent dans les domaines physiques et cognitifs (Marcora, 2010b), nous souhaitons élargir nos résultats et tester la possibilité de mesurer la perception de l'effort lors de tâches des membres supérieurs lorsque la demande mentale des tâches est manipulée. La collecte de données était censée se dérouler à l'hiver 2021 mais a été reportée en raison de la situation sanitaire liée à la COVID-2019. Nous présentons ici en perspective le protocole de la demande mentale de notre étude qui devrait débuter en juin 2021, et qui aspire à répondre à la question suivante : comment est régulée la perception de l'effort lors de tâches motrices des membres supérieurs lorsque la demande mentale de la tâche est manipulée ? L'objectif est de tester la possibilité de mesurer la perception de l'effort lorsque la demande mentale des tâches est manipulée et que la performance est contrôlée. Comme lors de la manipulation de la demande physique, nous utilisons le test du Box and Block et la tâche de pointage. Nous faisons l'hypothèse que l'incrémentation de la demande mentale entraînera une perception de l'effort plus élevée, et que la performance sera maintenue au coût d'une perception de l'effort plus élevée.

Vingt participants visiteront une seule fois le laboratoire. Dès leur arrivée, le matériel de fréquence respiratoire et cardiaque ainsi que l'électromyographe seront installés. Ils rempliront les questionnaires d'anthropométrie, de motivation (Matthews et al., 2001) et de fatigue (VAS fatigue, Le Mansec et al., 2017), ce qui nous permettra de prendre les valeurs de repos pour les variables physiologiques. La demande mentale sera manipulée via une tâche de Stoop, présentée sur un écran en face du participant. La tâche de pointage sera modifiée pour que les cibles présentées soient aux couleurs du test de Stroop : bleu,

vert, jaune, rouge. Le test du Box and Block n'aura pas besoin d'être modifié étant donné que les cubes sont de couleur correspondante. Trois niveaux de difficultés seront imposés : facile, modérée et difficile. Dans le niveau de difficulté facile, le participant choisira le cube ou la cible de son choix. Dans le niveau de difficulté modéré, le participant devra choisir la cible ou le cube dont le mot est inscrit à l'écran (Stroop congruent). Dans le niveau de difficulté difficile, le participant devra choisir la cible / le cube dont la couleur du mot apparaît à l'écran (Stroop incongruent). L'ordre des tests et des difficultés sera randomisé. Afin de contrôler la performance, les participants devront réaliser les tâches en suivant un tempo : 60bpm (1Hz) pour le test du Box and Block et 90bpm (1.5Hz) pour la tâche de pointage. L'examineur reportera visuellement la performance et les erreurs. Les participants devront réaliser deux essais de 30 s par niveau de difficulté. Il y aura 90 s de récupération entre les essais et 120 s de récupération entre les trois niveaux de difficulté. A la fin de chaque répétition de chaque essai, les participants devront reporter leur perception de l'effort à l'aide de la CR100. Après chaque niveau de difficulté, les participants devront remplir le NASA-TLX. A la fin de la visite, les participants reporteront à nouveau leur niveau de fatigue sur l'échelle VAS.

Ainsi, l'intégration de cette future étude, combinée à l'étude de ce mémoire, permettra de démontrer la pertinence d'utiliser la perception de l'effort lors de tâches motrices des membre supérieures dont la demande physique ou mentale a été manipulée. Ces résultats permettront ainsi d'ouvrir de nouvelles perspectives d'utilisation de la perception de l'effort auprès de population souffrant d'atteintes motrices et cognitives.

## IV. References

- Alexander, R. M. (1997, Feb). A minimum energy cost hypothesis for human arm trajectories. *Biol Cybern*, 76(2), 97-105. <https://doi.org/10.1007/s004220050324>
- Amann, M., Blain, G. M., Proctor, L. T., Sebranek, J. J., Pegelow, D. F., & Dempsey, J. A. (2010, Oct). Group III and IV muscle afferents contribute to ventilatory and cardiovascular response to rhythmic exercise in humans. *J Appl Physiol (1985)*, 109(4), 966-976. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00462.2010>
- Amann, M., Blain, G. M., Proctor, L. T., Sebranek, J. J., Pegelow, D. F., & Dempsey, J. A. (2011). Implications of group III and IV muscle afferents for high-intensity endurance exercise performance in humans. *The Journal of Physiology*, 589(Pt 21), 5299-5309. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2011.213769>
- Amann, M., & Light, A. R. (2014). Reply: To PMID 24142455. *Experimental physiology*, 99(5), 836-836.
- Amann, M., Proctor, L. T., Sebranek, J. J., Eldridge, M. W., Pegelow, D. F., & Dempsey, J. A. (2008, Dec). Somatosensory feedback from the limbs exerts inhibitory influences on central neural drive during whole body endurance exercise. *J Appl Physiol (1985)*, 105(6), 1714-1724. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.90456.2008>
- Amann, M., Venturelli, M., Ives, S. J., McDaniel, J., Layec, G., Rossman, M. J., & Richardson, R. S. (2013). Peripheral fatigue limits endurance exercise via a sensory feedback-mediated reduction in spinal motoneuronal output. *Journal of Applied Physiology*, 115(3), 355-364. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00049.2013>
- Amann, M., Wan, H.-Y., Thurston, T. S., Georgescu, V. P., & Weavil, J. C. (2020). On the Influence of Group III/IV Muscle Afferent Feedback on Endurance Exercise Performance. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 48(4), 209-216. <https://doi.org/10.1249/jes.0000000000000233>
- American College of Sports, M. (2000). *ACSM's guidelines for exercise testing and prescription*. Sixth edition. Philadelphia : Lippincott Williams & Wilkins, [2000] ©2000. <https://search.library.wisc.edu/catalog/999931853902121>
- Apps, M. A. J. (2018). Stimulating cingulate: distinct behaviours arise from discrete zones. *Brain*, 141(10), 2827-2830. <https://doi.org/10.1093/brain/awy224>
- Au, J. S., Totosy, D. E. Z. J. O., & Macdonald, M. J. (2017, Jun). Modeling Perceived Exertion during Graded Arm Cycling Exercise in Spinal Cord Injury. *Medicine*

- and science in sports and exercise*, 49(6), 1190-1196.  
<https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001203>
- Azevedo, A. d., Matos, L. F. d., Nakamura, F. Y., & Pereira, G. (2016). Perception of effort monitors internal load during compounded circuit training. *Motriz: Revista de Educação Física*, 22, 90-93.  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1980-65742016000100090&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-65742016000100090&nrm=iso)
- Backman, C., Gibson, S. C. D., & Parsons, J. (1992, 1992/10/01). Assessment of Hand Function: The Relationship between Pegboard Dexterity and Applied Dexterity. *Canadian Journal of Occupational Therapy*, 59(4), 208-213.  
<https://doi.org/10.1177/000841749205900406>
- Balasekaran, G., Loh, M., Govindaswamy, V., & Cai, S. (2014). Omni Scale Perceived Exertion responses in obese and normal weight male adolescents during cycle exercise. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 54(2), 186-196.
- Barbosa, T. C., Vianna, L. C., Fernandes, I. A., Prodel, E., Rocha, H. N. M., Garcia, V. P., Rocha, N. G., Secher, N. H., & Nobrega, A. C. L. (2016). Intrathecal fentanyl abolishes the exaggerated blood pressure response to cycling in hypertensive men. *The Journal of Physiology*, 594(3), 715-725. <https://doi.org/10.1113/JP271335>
- Barhorst, E. E., Andrae, W. E., Rayne, T. J., Falvo, M. J., Cook, D. B., & Lindheimer, J. B. (2020, Dec). Elevated Perceived Exertion in People with Myalgic Encephalomyelitis/Chronic Fatigue Syndrome and Fibromyalgia: A Meta-analysis. *Medicine and science in sports and exercise*, 52(12), 2615-2627.  
<https://doi.org/10.1249/mss.0000000000002421>
- Basten, U., Biele, G., Heekeren, H. R., & Fiebach, C. J. (2010). How the brain integrates costs and benefits during decision making. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(50), 21767-21772. <https://doi.org/10.1073/pnas.0908104107>
- Berchicci, M., Menotti, F., Macaluso, A., & Di Russo, F. (2013, 2013-April-15). The neurophysiology of central and peripheral fatigue during sub-maximal lower limb isometric contractions [Original Research]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(135). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00135>
- Bergson, B. (1902). L'effort Intellectuel. *Revue Philosophique de la France Et de l'Etranger*, 53(n/a), 1.
- Bergstrom, H. C., Housh, T. J., Cochrane, K. C., Jenkins, N. D. M., Zuniga, J. M., Buckner, S. L., Goldsmith, J. A., Schmidt, R. J., Johnson, G. O., & Cramer, J. T. (2015, 2015/10//). Factors underlying the perception of effort during constant heart rate running above and below the critical heart rate. *European Journal of*

- Applied Physiology*, 115(10), 2231-2241. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3204-y>
- Bigliassi, M. (2015, 07/03). Corollary Discharges and Fatigue-Related Symptoms: The Role of Attentional Focus. *Frontiers in Psychology*, 6, 1002. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01002>
- Borg, D. N., Stewart, I. B., Costello, J. T., Drovandi, C. C., & Minett, G. M. (2018, Oct 1). The impact of environmental temperature deception on perceived exertion during fixed-intensity exercise in the heat in trained-cyclists. *Physiol Behav*, 194, 333-340. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2018.06.026>
- Borg, E., & Borg, G. (2002, 03/01). A comparison of AME and CR100 for scaling perceived exertion. *Acta psychologica*, 109, 157-175. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(01\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(01)00055-5)
- Borg, E., & Kaijser, L. (2006). A comparison between three rating scales for perceived exertion and two different work tests. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 16(1), 57-69. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2005.00448.x>
- Borg, G. (1962, 01/01). Physical Performance and Perceived Exertion. *DhD Thesis*, 11.
- Borg, G. (1972). *A ratio scaling method for interindividual comparisons*. University of Stockholm, Institute of Applied Psychology.
- Borg, G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and science in sports and exercise*, 14(5), 377-381.
- Borg, G. (1994). *Principles and experiments in category-ratio scaling* (Vol. 789). Department of Psychology, Stockholm University.
- Borg, G. (1998). *Borg's perceived exertion and pain scales*. Human Kinetics.
- Borg, G., Hassmén, P., & Langerstrom, M. (1985, 01/01). Perceived exertion in relation to heart rate and blood lactate during arm and leg exercise. *Eur J Appl Physiol*, 65, 679-685.
- Borg, G., P, H., & M, L. (1987). Perceived-exertion-related-to-heart rate and blood lactate during arm and leg exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 679-685.
- Bouffard, J., Yang, C., Begon, M., & Côté, J. (2018, Apr 19). Sex differences in kinematic adaptations to muscle fatigue induced by repetitive upper limb movements. *Biol Sex Differ*, 9(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s13293-018-0175-9>

- Braith, R. W., Wood, C. E., Limacher, M. C., Pollock, M. L., Lowenthal, D. T., Phillips, M. I., & Staples, E. D. (1992). Abnormal neuroendocrine responses during exercise in heart transplant recipients. *Circulation*, *86*(5), 1453-1463. <https://doi.org/doi:10.1161/01.CIR.86.5.1453>
- Bray, S. R., Graham, J. D., Martin Ginis, K. A., & Hicks, A. L. (2012, 2012/01/01/). Cognitive task performance causes impaired maximum force production in human hand flexor muscles. *Biological Psychology*, *89*(1), 195-200. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.10.008>
- Brehm, J. W., & 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>
- Broxterman, R. M., Hureau, T. J., Layec, G., Morgan, D. E., Bledsoe, A. D., Jessop, J. E., Amann, M., & Richardson, R. S. (2018). Influence of group III/IV muscle afferents on small muscle mass exercise performance: a bioenergetics perspective. *The Journal of Physiology*, *596*(12), 2301-2314. <https://doi.org/10.1113/JP275817>
- Broxterman, R. M., Layec, G., Hureau, T. J., Morgan, D. E., Bledsoe, A. D., Jessop, J. E., Amann, M., & Richardson, R. S. (2017, Dec). Bioenergetics and ATP Synthesis during Exercise: Role of Group III/IV Muscle Afferents. *Medicine and science in sports and exercise*, *49*(12), 2404-2413. <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000001391>
- Burki, N. K., Davenport, P. W., Safdar, F., & Zechman, F. W. (1983). The Effects of Airway Anesthesia on Magnitude Estimation of Added Inspiratory Resistive and Elastic Loads. *American Review of Respiratory Disease*, *127*(1), 2-4. <https://doi.org/10.1164/arrd.1983.127.1.2>
- Cacioppo, J. T., Tassinary, L. G., & Berntson, G. G. (2007). Psychophysiological science: Interdisciplinary approaches to classic questions about the mind. In *Handbook of psychophysiology*, 3rd ed. (pp. 1-16). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546396.001>
- Canny, M. L., Thompson, J. M., & Wheeler, M. J. (2009, Jul-Aug). Reliability of the box and block test of manual dexterity for use with patients with fibromyalgia. *Am J Occup Ther*, *63*(4), 506-510. <https://doi.org/10.5014/ajot.63.4.506>
- Capostagno, B., Lambert, M. I., & Lamberts, R. P. (2016, Sep). A Systematic Review of Submaximal Cycle Tests to Predict, Monitor, and Optimize Cycling Performance. *Int J Sports Physiol Perform*, *11*(6), 707-714. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2016-0174>
- Carment, L., Abdellatif, A., Lafuente-Lafuente, C., Pariel, S., Maier, M. A., Belmin, J., & Lindberg, P. G. (2018). Manual Dexterity and Aging: A Pilot Study Disentangling

- Sensorimotor From Cognitive Decline. *Frontiers in neurology*, 9, 910-910.  
<https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00910>
- Carrier, D. R., Anders, C., & Schilling, N. (2011). The musculoskeletal system of humans is not tuned to maximize the economy of locomotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(46), 18631-18636.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1105277108>
- Caruana, F., Gerbella, M., Avanzini, P., Gozzo, F., Pelliccia, V., Mai, R., Abdollahi, R. O., Cardinale, F., Sartori, I., Lo Russo, G., & Rizzolatti, G. (2018, Oct 1). Motor and emotional behaviours elicited by electrical stimulation of the human cingulate cortex. *Brain*, 141(10), 3035-3051. <https://doi.org/10.1093/brain/awy219>
- Cederlund, R. (2009, 07/12). The Use of Dexterity Tests in Hand Rehabilitation. *Scandinavian Journal of Occupational Therapy*, 2, 99-104.  
<https://doi.org/10.3109/11038129509106801>
- Christian, R., Bishop, D., GIRARD, O., & Billaut, F. (2014, 2014-March-31). The role of sense of effort on self-selected cycling power output [Original Research]. *Frontiers in Physiology*, 5(115). <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00115>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioural sciences* (Vol. null).
- Cook, D. B., Light, A. R., Light, K. C., Broderick, G., Shields, M. R., Dougherty, R. J., Meyer, J. D., VanRiper, S., Stegner, A. J., Ellingson, L. D., & Vernon, S. D. (2017, 2017/05/01/). Neural consequences of post-exertion malaise in Myalgic Encephalomyelitis/Chronic Fatigue Syndrome. *Brain, Behavior, and Immunity*, 62, 87-99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bbi.2017.02.009>
- Coquart, J. B. J., Lensele, G., & Garcin, M. (2009, 2009/06/01/). Perception de l'effort chez l'enfant et l'adolescent : mesure et intérêts. *Science & Sports*, 24(3), 137-145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scispo.2008.07.006>
- Cos, I. (2017a). Correction: Perceived Effort for Motor Control and Decision-Making. *PLOS Biology*, 15(11), e1002617. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002617>
- Cos, I. (2017b). Perceived effort for motor control and decision-making. *PLOS Biology*, 15(8), e2002885-e2002885. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2002885>
- Côté, J. N. (2014). Adaptations to neck/shoulder fatigue and injuries. *Adv Exp Med Biol*, 826, 205-228. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1338-1\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1338-1_13)
- Craig, A. D. (1995, Oct 16). Distribution of brainstem projections from spinal lamina I neurons in the cat and the monkey. *J Comp Neurol*, 361(2), 225-248.  
<https://doi.org/10.1002/cne.903610204>

- Craig, A. D. (2003). PAIN MECHANISMS: Labeled Lines Versus Convergence in Central Processing. *Annual Review of Neuroscience*, 26(1), 1-30. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.26.041002.131022>
- Davies, R. C., Rowlands, A. V., & Eston, R. G. (2009, Sep). Effect of exercise-induced muscle damage on ventilatory and perceived exertion responses to moderate and severe intensity cycle exercise. *Eur J Appl Physiol*, 107(1), 11-19. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1094-6>
- Davis, J., & Green, J. (2009, 01/01). Caffeine and anaerobic performance: ergogenic value and mechanisms of action. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 39, 813-832.
- De Doncker, W., Charles, L., Ondobaka, S., & Kuppuswamy, A. (2020). Exploring the relationship between effort perception and poststroke fatigue. *Neurology*, 95(24), e3321-e3330. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000010985>
- de Morree, H. M., Klein, C., & Marcora, S. (2012). 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>
- de Morree, H. M., Klein, C., & S., M. (2014). Cortical substrates of the effects of caffeine and time-on-task on perception of effort. *Journal of Applied Physiology*, 117(12), 1514-1523. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00898.2013>
- de Morree, H. M., & Marcora, S. (2010, 2010/12/01/). The face of effort: Frowning muscle activity reflects effort during a physical task. *Biological Psychology*, 85(3), 377-382. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2010.08.009>
- de Morree, H. M., & Marcora, S. (2012, 2012/05/01). Frowning muscle activity and perception of effort during constant-workload cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 112(5), 1967-1972. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2138-2>
- de Morree, H. M., & Marcora, S. (2013, 2013/09/01). Effects of isolated locomotor muscle fatigue on pacing and time trial performance. *European Journal of Applied Physiology*, 113(9), 2371-2380. <https://doi.org/10.1007/s00421-013-2673-0>
- de Morree, H. M., & 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](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1236-0_17)
- de Morree, H. M., Marcora, S., Gendolla, G. H. E., Tops, M., & Koole, S. L. (2015). *Biobehavioral approaches to self-regulation* (Vol. null).
- Décombe, A., Brunel, L., Capdevielle, D., & Raffard, S. (2020, Jul). Too much or too little? Exploring effort perception in schizophrenia within the framework of



- motivational intensity theory. *Cogn Neuropsychiatry*, 25(4), 312-327.  
<https://doi.org/10.1080/13546805.2020.1798220>
- Deecke, L., & Kornhuber, H. H. (2003). Human Freedom, Reasoned Will, and the Brain: The Bereitschaftspotential Story. In M. Jahanshahi & M. Hallett (Eds.), *The Bereitschaftspotential: Movement-Related Cortical Potentials* (pp. 283-320). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0189-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0189-3_17)
- Demanet, J., Muhle-Karbe, P., Lynn, M., Blotenberg, I., & Brass, M. (2013, 09/20). Power to the will: How exerting physical effort boosts the sense of agency. *Cognition*, 129, 574-578. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.08.020>
- Desrosiers, J., Bravo, G., Hébert, R., Dutil, É., & Mercier, L. (1994, 1994/07/01/). Validation of the Box and Block Test as a measure of dexterity of elderly people: Reliability, validity, and norms studies. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 75(7), 751-755. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0003-9993\(94\)90130-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0003-9993(94)90130-9)
- Dewey, J. (1897). The Psychology of Effort. *The Philosophical Review*, 6(1), 43-56.  
<https://doi.org/10.2307/2175586>
- Domkin, D., Laczko, J., Jaric, S., Johansson, H., & Latash, M. L. (2002, Mar). Structure of joint variability in bimanual pointing tasks. *Exp Brain Res*, 143(1), 11-23.  
<https://doi.org/10.1007/s00221-001-0944-1>
- Englert, C., Pageaux, B., & Wolff, W. (2020). Self-Control in Sports. In *PsyArXiv*.  
[https://doi.org/ https://doi.org/10.31234/osf.io/695c2](https://doi.org/https://doi.org/10.31234/osf.io/695c2)
- Enoka, R. M., & Stuart, D. G. (1992). *Journal of Applied Physiology*, 72(5), 1631.
- Eston, R., & Parfitt, G. (2018). Perceived Exertion, Heart Rate, and other Non-Invasive Methods for Exercise Testing and Intensity Control. In (pp. 464-499).  
<https://doi.org/10.4324/9781315385662-18>
- Eston, R. G., Davies, B. L., & Williams, J. G. (1987). Use of perceived effort ratings to control exercise intensity in young healthy adults. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 56(2), 222-224. <https://doi.org/10.1007/bf00640648>
- Faelli, E., Ferrando, V., Bisio, A., Ferrando, M., Torre, A., Panasci, M., & Ruggeri, P. (2019, Sep). Effects of Two High-intensity Interval Training Concepts in Recreational Runners. *Int J Sports Med*, 40(10), 639-644.  
<https://doi.org/10.1055/a-0964-0155>
- Fanchini, M., Ferraresi, I., Modena, R., Schena, F., Coutts, A. J., & Impellizzeri, F. M. (2016, Apr). Use of CR100 Scale for Session Rating of Perceived Exertion in

- Soccer and Its Interchangeability With the CR10. *Int J Sports Physiol Perform*, 11(3), 388-392. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0273>
- Farina, D., Merletti, R., & Enoka, R. M. (2014). The extraction of neural strategies from the surface EMG: an update. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 117(11), 1215-1230. <https://doi.org/10.1152/jap.00162.2014>
- Fernandes, A., Galbo, H., Kjaer, M., Mitchell, J. H., Secher, N. H., & Thomas, S. N. (1990). Cardiovascular and ventilatory responses to dynamic exercise during epidural anaesthesia in man. *The Journal of Physiology*, 420, 281-293. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1990.sp017912>
- Fernandez, C., Firdous, S., Jehangir, W., Behm, B., Mehta, Z., Berger, A., & Davis, M. (2019, 2020/01/01). Cancer-Related Fatigue: Perception of Effort or Task Failure? *American Journal of Hospice and Palliative Medicine®*, 37(1), 34-40. <https://doi.org/10.1177/1049909119849420>
- Field, A. (2005). *Discovering statistics using SPSS, 2nd ed.* Sage Publications, Inc.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391. <https://doi.org/10.1037/h0055392>
- Flairty, J. E., & Schedler, C. M. (2020). Perceived and Heart Rate-based Intensities during Self-paced Walking: Magnitudes and Comparison. *International journal of exercise science*, 13(5), 677-688. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32509131>  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7241645/>
- Forster, K. a. (2011). Reflexes Controlling Circulatory, Ventilatory and Airway Responses to Exercise. In *Comprehensive Physiology* (pp. 381-447). <https://doi.org/10.1002/cphy.cp120110>
- Foster, C. (1998, Jul). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Medicine and science in sports and exercise*, 30(7), 1164-1168. <https://doi.org/10.1097/00005768-199807000-00023>
- Foster, C., Florhaug, J. A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., Parker, S., Doleshal, P., & Dodge, C. (2001). A New Approach to Monitoring Exercise Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15, 10Y 115.
- Fragala-Pinkham, M., O'Neil, M. E., Lennon, N., Forman, J. L., & Trost, S. G. (2015, Aug). Validity of the OMNI rating of perceived exertion scale for children and adolescents with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*, 57(8), 748-753. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12703>

- Gammon, C., Pfeiffer, K. A., Pivarnik, J. M., Moore, R. W., Rice, K. R., & Trost, S. G. (2016, Aug). Age-Related Differences in OMNI-RPE Scale Validity in Youth: A Longitudinal Analysis. *Medicine and science in sports and exercise*, 48(8), 1590-1594. <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000000918>
- Gandevia, S. C. (2001, Oct). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev*, 81(4), 1725-1789. <https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.4.1725>
- Gandevia, S. C., & McCloskey, D. I. (1977a). Changes in motor commands, as shown by changes in perceived heaviness, during partial curarization and peripheral anaesthesia in man. *The Journal of Physiology*, 272(3), 673-689. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1977.sp012066>
- Gandevia, S. C., & McCloskey, D. I. (1977b, 1977/06//). Sensations of heaviness. *Brain : a journal of neurology*, 100(2), 345-354. <https://doi.org/10.1093/brain/100.2.345>
- Gearhart, R. F. J., Lagally, K. M., Riechman, S. E., Andrews, R. D., & Robertson, R. J. (2009). Strength Tracking Using the OMNI Resistance Exercise Scale in Older Men and Women. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 23(3), 1011-1015. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181a2ec41>
- Gillies, M., Huang, Y., Hyam, J. A., Aziz, T. Z., & Green, A. L. (2019, 2019/01/01/). Direct neurophysiological evidence for a role of the human anterior cingulate cortex in central command. *Autonomic Neuroscience*, 216, 51-58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autneu.2018.09.004>
- Girard, O., & Racinais, S. (2014). Combining heat stress and moderate hypoxia reduces cycling time to exhaustion without modifying neuromuscular fatigue characteristics. *European Journal of Applied Physiology*, 114(7), 1521-1532. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-2883-0>
- Goodall, S., Ross, E. Z., & Romer, L. M. (2010). Effect of graded hypoxia on supraspinal contributions to fatigue with unilateral knee-extensor contractions. *Journal of Applied Physiology*, 109(6), 1842-1851.
- Goosey-Tolfrey, V., LENTON, J., GODDARD, J., OLDFIELD, V., TOLFREY, K., & ESTON, R. (2010). Regulating Intensity Using Perceived Exertion in Spinal Cord-Injured Participants. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(3), 608-613. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181b72cbc>
- Grazzini, M., Stendardi, L., Gigliotti, F., & Scano, G. (2005, 2005/11/01/). Pathophysiology of exercise dyspnea in healthy subjects and in patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD). *Respiratory Medicine*, 99(11), 1403-1412. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rmed.2005.03.005>

- Hart, S. G. (2006, 2006/10/01). Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(9), 904-908. <https://doi.org/10.1177/154193120605000909>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Advances in Psychology* (Vol. 52, pp. 139-183). North-Holland. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hayashi, K., Honda, Y., Ogawa, T., Kondo, N., & Nishiyasu, T. (2006, Feb). Relationship between ventilatory response and body temperature during prolonged submaximal exercise. *J Appl Physiol* (1985), 100(2), 414-420. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00541.2005>
- Helms, E. R., Brown, S. R., Cross, M. R., Storey, A., Cronin, J., & Zourdos, M. C. (2017, Oct). Self-Rated Accuracy of Rating of Perceived Exertion-Based Load Prescription in Powerlifters. *J Strength Cond Res*, 31(10), 2938-2943. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000002097>
- Hertzog, C., Kramer, A. F., Wilson, R. S., & Lindenberger, U. (2008, Oct). Enrichment Effects on Adult Cognitive Development: Can the Functional Capacity of Older Adults Be Preserved and Enhanced? *Psychol Sci Public Interest*, 9(1), 1-65. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6053.2009.01034.x>
- Hess, T. M., Smith, B. T., & Sharifian, N. (2016, Nov). Aging and effort expenditure: The impact of subjective perceptions of task demands. *Psychol Aging*, 31(7), 653-660. <https://doi.org/10.1037/pag0000127>
- Higgins, L. W., Robertson, R. J., Kelsey, S. F., Olson, M. B., Hoffman, L. A., Rebovich, P. J., Haile, L., & Orenstein, D. M. (2013, May). Exercise intensity self-regulation using the OMNI scale in children with cystic fibrosis. *Pediatr Pulmonol*, 48(5), 497-505. <https://doi.org/10.1002/ppul.22639>
- Hobbins, L., Gaoua, N., Hunter, S., & Girard, O. (2019, 2019/10/01/). Psycho-physiological responses to perceptually-regulated interval runs in hypoxia and normoxia. *Physiology & Behavior*, 209, 112611. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2019.112611>
- Horstman, D. H., Morgan, W. P., Cymerman, A., & Stokes, J. (1979, Jun). Perception of effort during constant work to self-imposed exhaustion. *Percept Mot Skills*, 48(3 Pt 2), 1111-1126. <https://doi.org/10.2466/pms.1979.48.3c.1111>
- Hreljac, A. (1993, 1993/10/). Preferred and energetically optimal gait transition speeds in human locomotion. *Medicine and science in sports and exercise*, 25(10), 1158-1162. <http://europepmc.org/abstract/MED/8231761>

- Ikeda, A., & Shibasaki, H. (2003). Generator Mechanisms of Bereitschaftspotentials as Studied by Epicortical Recording in Patients with Intractable Partial Epilepsy. In M. Jahanshahi & M. Hallett (Eds.), *The Bereitschaftspotential: Movement-Related Cortical Potentials* (pp. 45-59). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0189-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0189-3_4)
- Impellizzeri, F. M., Rampinini, E., Coutts, A. J., Sassi, A., & Marcora, S. M. (2004, Jun). Use of RPE-based training load in soccer. *Medicine and science in sports and exercise*, 36(6), 1042-1047. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000128199.23901.2f>
- Inzlicht, M., Shenhav, A., & 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., & Pageaux. (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>
- James, W., & History, B. S. o. N. (1880). *The Feeling of Effort*. The Society. <https://books.google.ca/books?id=I8MnAAAAYAAJ>
- Jankelowitz, S. K., & Colebatch, J. G. (2005, Feb). Movement related potentials in acutely induced weakness and stroke. *Exp Brain Res*, 161(1), 104-113. <https://doi.org/10.1007/s00221-004-2051-6>
- Jeffries, O., Patterson, S. D., & Waldron, M. (2019, May). The effect of severe and moderate hypoxia on exercise at a fixed level of perceived exertion. *Eur J Appl Physiol*, 119(5), 1213-1224. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04111-y>
- Jones, E. G. (1972, Jul). The development of the 'muscular sense' concept during the nineteenth century and the work of H. Charlton Bastian. *J Hist Med Allied Sci*, 27(3), 298-311. <https://doi.org/10.1093/jhmas/xxvii.3.298>
- Jones, L. A. (1995). The senses of effort and force during fatiguing contractions. *Adv Exp Med Biol*, 384, 305-313. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1016-5\\_24](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1016-5_24)
- Jones, L. A., & Hunter, I. W. (1983, Sep). Effect of fatigue on force sensation. *Exp Neurol*, 81(3), 640-650. [https://doi.org/10.1016/0014-4886\(83\)90332-1](https://doi.org/10.1016/0014-4886(83)90332-1)
- Joseph, T., Johnson, B., Battista, R. A., Wright, G., Dodge, C., Porcari, J. P., de Koning, J. J., & Foster, C. (2008, 2008/02//). Perception of fatigue during simulated competition. *Medicine and science in sports and exercise*, 40(2), 381-386. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31815a83f6>

- Kaufman, M., Hayes, S., Adreani, C., & Pickar, J. (2002, 02/01). Discharge Properties of Group III and IV Muscle Afferents. *Advances in experimental medicine and biology*, 508, 25-32. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0713-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0713-0_4)
- Kjær, M., Hanel, B., Worm, L., Perko, G., Lewis, S. F., Sahlin, K., Galbo, H., & Secher, N. H. (1999). Cardiovascular and neuroendocrine responses to exercise in hypoxia during impaired neural feedback from muscle. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 277(1), R76-R85. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1999.277.1.R76>
- Korol, G., Karniel, A., Melzer, I., Ronen, A., Edan, Y., Stern, H., & Riemer, R. (2017, 01/01). Relation between Perceived Effort and the Electromyographic Signal in Localized Effort Activities of Forearm Muscles. *Journal of Ergonomics*, 7. <https://doi.org/10.4172/2165-7556.1000.S6-004>
- Kozłowski, B., Pageaux, B., Hubbard, E. F., St. Peters, B., Millar, P. J., & Power, G. A. (2021). Perception of effort during an isometric contraction is influenced by prior muscle lengthening or shortening. *bioRxiv*, 2021.2003.2029.437599. <https://doi.org/10.1101/2021.03.29.437599>
- Kuppuswamy, A., Clark, E. V., Turner, I. F., Rothwell, J. C., & Ward, N. S. (2015, Jan). Post-stroke fatigue: a deficit in corticomotor excitability? *Brain*, 138(Pt 1), 136-148. <https://doi.org/10.1093/brain/awu306>
- Lacroix, J., Daviet, J.-C., Salle, J.-Y., Borel, B., Compagnat, M., & Mandigout, S. (2019, 06/30). Effort Assessment of Stroke Patients in Physiotherapy Session by Accelerometry and Perceived Exertion Score: Preliminary Study. *Annals of Rehabilitation Medicine*, 43, 262-268. <https://doi.org/10.5535/arm.2019.43.3.262>
- Le Mansec, Y., Pageaux, Nordez, A., Dorel, S., & Jubeau, M. (2017, 12/20). Mental fatigue alters the speed and the accuracy of the ball in table tennis. *Journal of sports sciences*, 36. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1418647>
- Lin, K. C., Chuang, L. L., Wu, C. Y., Hsieh, Y. W., & Chang, W. Y. (2010). Responsiveness and validity of three dexterous function measures in stroke rehabilitation. *J Rehabil Res Dev*, 47(6), 563-571. <https://doi.org/10.1682/jrrd.2009.09.0155>
- Lourenção, M., Battistella, L., Martins, L., & Litvoc, J. (2005, 04/01). Analysis of the results of functional electric stimulation on hemiplegic patients' upper extremities using the Minnesota manual dexterity test. *International journal of rehabilitation research. Internationale Zeitschrift für Rehabilitationsforschung. Revue internationale de recherches de réadaptation*, 28, 25-31. <https://doi.org/10.1097/00004356-200503000-00004>

- Luu, B. L., Smith, J. L., Martin, P. G., McBain, R. A., Taylor, J. L., & Butler, J. E. (2016). Feedforward consequences of isometric contractions: effort and ventilation. *Physiological reports*, 4(15), e12882. <https://doi.org/10.14814/phy2.12882>
- Macdonald, J. H., Fearn, L., Jibani, M., & Marcora, S. M. (2012, Dec). Exertional fatigue in patients with CKD. *Am J Kidney Dis*, 60(6), 930-939. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2012.06.021>
- Maikala, R. V., & Bhambhani, Y. N. (2006, Jun). Comparisons of physiological and perceptual responses in healthy men and women during standardized arm cranking and task-specific pushing-pulling. *Int Arch Occup Environ Health*, 79(6), 509-520. <https://doi.org/10.1007/s00420-005-0076-1>
- Makofske, B. (2011). Manual Dexterity. In J. S. Kreutzer, J. DeLuca, & B. Caplan (Eds.), *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology* (pp. 1522-1523). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-79948-3\\_1460](https://doi.org/10.1007/978-0-387-79948-3_1460)
- Marcora, S. (2008a, 2008/07/10). Do we really need a central governor to explain brain regulation of exercise performance? *European Journal of Applied Physiology*, 104(5), 929. <https://doi.org/10.1007/s00421-008-0818-3>
- Marcora, S. (2008b). *The end-spurt does not require a subconscious intelligent system.*
- 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). Counterpoint: Afferent Feedback From Fatigued Locomotor Muscles Is Not An Important Determinant Of Endurance Exercise Performance. *Journal of Applied Physiology*, 108(2), 454-456. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00976.2009a>
- Marcora, S. (2010b). Effort: Perception of. 380-383.
- Marcora, S. (2011, May). Role of feedback from Group III and IV muscle afferents in perception of effort, muscle pain, and discomfort. *J Appl Physiol (1985)*, 110(5), 1499; author reply 1500. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00146.2011>
- Marcora, S. (2015, 09/17). The variable monitored by the CNS to continuously optimize walking: energy cost or perception of effort? *Current Biology*.
- Marcora, S. (2016, Jan). Can Doping be a Good Thing? Using Psychoactive Drugs to Facilitate Physical Activity Behaviour. *Sports Med*, 46(1), 1-5. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0412-x>

- Marcora, S. (2019). Psychobiology of fatigue during endurance exercise. In C. Meijen (Ed.), *Endurance Performance in Sport: Psychological theory and interventions* (pp. 248). Routledge Taylor&Francis Group.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9781315167312>
- Marcora, S., & Staiano, W. (2010, 2010/07/01). 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>
- Martin, S. W., Menaspà P, Hennessey T, Marcora S, Keegan R, et al. (2016). Superior Inhibitory Control and Resistance to Mental Fatigue in Professional Road Cyclists. . *PLOS ONE*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159907>
- Mathiowetz, V. G., Kashman N., Weber K. (1985). Adult Norills for the Box and Block Test of Manual Dexterity. *The American Journal of Occupational Therapy*, *39*, 386-391.
- Matthews, G., Campbell, S. E., & Falconer, S. (2001, 2001/10/01). Assessment of Motivational States in Performance Environments. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *45*(13), 906-910.  
<https://doi.org/10.1177/154193120104501302>
- Matthews, S. C., Paulus, M. P., Simmons, A. N., Nelesen, R. A., & Dimsdale, J. E. (2004, 2004/07/01/). Functional subdivisions within anterior cingulate cortex and their relationship to autonomic nervous system function. *NeuroImage*, *22*(3), 1151-1156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.03.005>
- McCloskey, D. I. (1981). Corollary discharges: Motor commands and perception. 1415-1447.
- McCloskey, D. I. (1983, 1983). Muscle sense and effort : Motor commands and judgments about muscular contractions. *Adv. Neurol.*, *39*, 151-167.  
<https://ci.nii.ac.jp/naid/10025760577/en/>
- McCloskey, D. I., Ebeling, P., & Goodwin, G. M. (1974, 1974/01/01/). Estimation of weights and tensions and apparent involvement of a “sense of effort”. *Experimental Neurology*, *42*(1), 220-232.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0014-4886\(74\)90019-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0014-4886(74)90019-3)
- McCulloch, J., Lorenz, D., Kloby, M., Aslan, S. C., Love, M., & De Paleville, D. T. (2018). Prediction of Maximal Oxygen Consumption from Rating of Perceived Exertion (RPE) using a Modified Total-body Recumbent Stepper. *International journal of exercise science*, *8*(4), 414-424.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30159108>  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6108154/>



- Meir, G., Hutchinson, J. C., Habeeb, C. M., Boiangin, N. M., Shaffer, C., Basevitch, I., & Tenenbaum, G. (2015, 2015/10/02). Are the Measurements of Attention Allocation and Perceived Exertion Trustworthy? *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 19(4), 167-176. <https://doi.org/10.1080/1091367X.2015.1061531>
- Miller, P. C., Hall, E. E., Chmelo, E. A., Morrison, J. M., DeWitt, R. E., & Kostura, C. M. (2009, Mar). The influence of muscle action on heart rate, RPE, and affective responses after upper-body resistance exercise. *J Strength Cond Res*, 23(2), 366-372. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31818548f6>
- Missenard, O., Mottet, D., & 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>
- Mitchell, J., Reeves Jr, D., Rogers, H., & Secher, N. (1989). Epidural anaesthesia and cardiovascular responses to static exercise in man. *The Journal of Physiology*, 417(1), 13-24.
- Morales-Alamo, D., Losa-Reyna, J., Torres-Peralta, R., Martin-Rincon, M., Perez-Valera, M., Curtelin, D., Ponce-González, J. G., Santana, A., & Calbet, J. A. (2015, Oct 15). What limits performance during whole-body incremental exercise to exhaustion in humans? *J Physiol*, 593(20), 4631-4648. <https://doi.org/10.1113/jp270487>
- Morel, P., Ulbrich, P., & Gail, A. (2017). What makes a reach movement effortful? Physical effort discounting supports common minimization principles in decision making and motor control. *PLOS Biology*, 15(6), e2001323. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2001323>
- Myers, J., Atwood, J. E., Sullivan, M., Forbes, S., Friis, R., Pewen, W., & Froelicher, V. (1987). Perceived exertion and gas exchange after calcium and beta-blockade in atrial fibrillation. *Journal of Applied Physiology*, 63(1), 97-104. <https://doi.org/10.1152/jappl.1987.63.1.97>
- Neva, J. L., Brown, K. E., Wadden, K. P., Mang, C. S., Borich, M. R., Meehan, S. K., & Boyd, L. A. (2019). The effects of five sessions of continuous theta burst stimulation over contralesional sensorimotor cortex paired with paretic skilled motor practice in people with chronic stroke. *Restor Neurol Neurosci*, 37(3), 273-290. <https://doi.org/10.3233/rnn-190916>
- Nicolò, A., Bazzucchi, I., Haxhi, J., Felici, F., & Sacchetti, M. (2014). Comparing Continuous and Intermittent Exercise: An “Isoeffort” and “Isotime” Approach. *PLOS ONE*, 9(4), e94990. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094990>

- Nicolò, A., Marcora, S., & Sacchetti, M. (2016, 2016/07/02). Respiratory frequency is strongly associated with perceived exertion during time trials of different duration. *Journal of sports sciences*, 34(13), 1199-1206. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1102315>
- O'Connor, P. J., & Cook, D. B. (2001, Jun). Moderate-intensity muscle pain can be produced and sustained during cycle ergometry. *Medicine and science in sports and exercise*, 33(6), 1046-1051. <https://doi.org/10.1097/00005768-200106000-00026>
- O'Donnell, D. E., Banzett, R. B., Carrieri-Kohlman, V., Casaburi, R., Davenport, P. W., Gandevia, S. C., Gelb, A. F., Mahler, D. A., & Webb, K. A. (2007, May). Pathophysiology of dyspnea in chronic obstructive pulmonary disease: a roundtable. *Proc Am Thorac Soc*, 4(2), 145-168. <https://doi.org/10.1513/pats.200611-159CC>
- Oldfield, R. C. (1971, 1971/03/01/). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Otto, A., Emery, K., & Côté, J. (2018, 09/01). Differences in muscular and perceptual responses to a neck/shoulder fatiguing task between women and men. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2018.09.010>
- Otto, A., Emery, K., & Côté, J. N. (2019, Aug 7). Sex differences in perceptual responses to experimental pain before and after an experimental fatiguing arm task. *Biol Sex Differ*, 10(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s13293-019-0253-7>
- Pageaux. (2014, 2014/09/01). The Psychobiological Model of Endurance Performance: An Effort-Based Decision-Making Theory to Explain Self-Paced Endurance Performance. *Sports Medicine*, 44(9), 1319-1320. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0198-2>
- Pageaux. (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, & Gaveau, J. (2016). Studies using pharmacological blockade of muscle afferents provide new insights into the neurophysiology of perceived exertion. *The Journal of Physiology*, 594(18), 5049-5051. <https://doi.org/10.1113/jp272585>
- Pageaux, & Lepers, R. (2016, 2016-November-29). Fatigue Induced by Physical and Mental Exertion Increases Perception of Effort and Impairs Subsequent Endurance Performance [Mini Review]. *Frontiers in Physiology*, 7(587). <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00587>

- Pageaux, & Lepers, R. (2018). The effects of mental fatigue on sport-related performance. *Prog Brain Res*, 240, 291-315.  
<https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2018.10.004>
- Pageaux, Lepers, R., Dietz, K. C., & Marcora, S. M. (2014, 2014/05/01). 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, Lepers, R., & Marcora, S. M. (2016). Reliability of a Novel High Intensity One Leg Dynamic Exercise Protocol to Measure Muscle Endurance. *PLOS ONE*, 11(10), e0163979. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163979>
- Pageaux, Marcora, S., & Lepers, R. (2013). Prolonged mental exertion does not alter neuromuscular function of the knee extensors. *Medicine & Science in Sports & Exercise*.
- Pageaux, Marcora, S., Rozand, V., & Lepers, R. (2015, 2015-February-25). Mental fatigue induced by prolonged self-regulation does not exacerbate central fatigue during subsequent whole-body endurance exercise [Original Research]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(67). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00067>
- Pandolf, K. B. (1983). ADVANCES IN THE STUDY AND APPLICATION OF PERCEIVED EXERTION. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 11(1), 118-158.  
[https://journals.lww.com/acsm-essr/Fulltext/1983/01000/ADVANCES\\_IN\\_THE\\_STUDY\\_AND\\_APPLICATION\\_OF\\_PERCEIVED.5.aspx](https://journals.lww.com/acsm-essr/Fulltext/1983/01000/ADVANCES_IN_THE_STUDY_AND_APPLICATION_OF_PERCEIVED.5.aspx)
- Parvizi, J., Rangarajan, V., Shirer, W. R., Desai, N., & Greicius, Michael D. (2013, 2013/12/18/). The Will to Persevere Induced by Electrical Stimulation of the Human Cingulate Gyrus. *Neuron*, 80(6), 1359-1367.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.10.057>
- Paterson, D. J. (2014, Feb 1). Defining the neurocircuitry of exercise hyperpnoea. *J Physiol*, 592(3), 433-444. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2013.261586>
- Pina, Apstein, Balady, G. J., Belardinelli, R., Chaitman, B. R., Duscha, B. D., Fletcher, B. J., Fleg, J. L., Myers, J. N., Sullivan, M. J., American Heart Association Committee on exercise, r., & prevention. (2003, Mar 4). Exercise and heart failure: A statement from the American Heart Association Committee on exercise, rehabilitation, and prevention. *Circulation*, 107(8), 1210-1225.  
<https://doi.org/10.1161/01.cir.0000055013.92097.40>
- Pollak, K. A., Swenson, J. D., Vanhaisma, T. A., Hughen, R. W., Jo, D., White, A. T., Light, K. C., Schweinhardt, P., Amann, M., & Light, A. R. (2014). Exogenously

- applied muscle metabolites synergistically evoke sensations of muscle fatigue and pain in human subjects. *Experimental physiology*, 99(2), 368-380.  
<https://doi.org/10.1113/expphysiol.2013.075812>
- Preston, W. (2009). Elbow Grease: When Action Feels like work. 569-586.
- Richter, M., Gendolla, G. H. E., & Wright, R. A. (2016). Three Decades of Research on Motivational Intensity Theory. In (pp. 149-186).  
<https://doi.org/10.1016/bs.adms.2016.02.001>
- Ries, A. L., Bauldoff, G. S., Carlin, B. W., Casaburi, R., Emery, C. F., Mahler, D. A., Make, B., Rochester, C. L., Zuwallack, R., & Herrerias, C. (2007, May). Pulmonary Rehabilitation: Joint ACCP/AACVPR Evidence-Based Clinical Practice Guidelines. *Chest*, 131(5 Suppl), 4s-42s.  
<https://doi.org/10.1378/chest.06-2418>
- Robert, H., Casillas, J. M., Iskandar, M., D'Athis, P., Antoine, D., Taha, S., Didier, V., Scaglioni, G., Caillaux, B. X., & Van Hoecke, J. (2004, 2004/10/01/). Le Score d'activité physique de Dijon : reproductibilité et corrélations avec l'aptitude physique de sujets sains âgés. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 47(8), 546-554. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2004.03.005>
- Robertson, R. J. (1982). *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14(5), 390.
- Robertson, R. J., Goss, F. L., Andreacci, J. L., Dube, J. J., Rutkowski, J. J., Frazee, K. M., Aaron, D. J., Metz, K. F., Kowallis, R. A., & Snee, B. M. (2005, May). Validation of the Children's OMNI-Resistance Exercise Scale of perceived exertion. *Medicine and science in sports and exercise*, 37(5), 819-826.  
<https://doi.org/10.1249/01.mss.0000162619.33236.fl>
- Robertson, R. J., GOSS, F. L., BOER, N. F., PEOPLES, J. A., FOREMAN, A. J., DABAYEBEH, I. M., MILLICH, N. B., BALASEKARAN, G., RIECHMAN, S. E., GALLAGHER, J. D., & THOMPSON, T. (2000). Children's OMNI Scale of Perceived Exertion: mixed gender and race validation. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(2), 452. [https://journals.lww.com/acsm-msse/Fulltext/2000/02000/Children\\_s\\_OMNI\\_Scale\\_of\\_Perceived\\_Exertion\\_mixed.29.aspx](https://journals.lww.com/acsm-msse/Fulltext/2000/02000/Children_s_OMNI_Scale_of_Perceived_Exertion_mixed.29.aspx)
- Robertson, R. J., Goss, F. L., Rutkowski, J., Lenz, B., Dixon, C., Timmer, J., Frazee, K., Dube, J., & Andreacci, J. (2003, Feb). Concurrent validation of the OMNI perceived exertion scale for resistance exercise. *Medicine and science in sports and exercise*, 35(2), 333-341.  
<https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000048831.15016.2A>
- Robertson, R. J., & Noble, B. J. (1997). Perception of physical exertion: methods, mediators, and applications. *Exerc Sport Sci Rev*, 25, 407-452.

- Sacheli, M. A., Neva, J. L., Lakhani, B., Murray, D. K., Vafai, N., Shahinfard, E., English, C., McCormick, S., Dinelle, K., Neilson, N., McKenzie, J., Schulzer, M., McKenzie, D. C., Appel-Cresswell, S., McKeown, M. J., Boyd, L. A., Sossi, V., & Stoessl, A. J. (2019, Dec). Exercise increases caudate dopamine release and ventral striatal activation in Parkinson's disease. *Mov Disord*, *34*(12), 1891-1900. <https://doi.org/10.1002/mds.27865>
- Scherr, J., Wolfarth, B., Christle, J. W., Pressler, A., Wagenpfeil, S., & Halle, M. (2013, Jan). Associations between Borg's rating of perceived exertion and physiological measures of exercise intensity. *Eur J Appl Physiol*, *113*(1), 147-155. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2421-x>
- Scott, T. J., Black, C. R., Quinn, J., & Coutts, A. J. (2013, Jan). Validity and reliability of the session-RPE method for quantifying training in Australian football: a comparison of the CR10 and CR100 scales. *J Strength Cond Res*, *27*(1), 270-276. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182541d2e>
- Seed, J. D., St. Peters, B., Power, G. A., & Millar, P. J. (2019). Cardiovascular responses during isometric exercise following lengthening and shortening contractions. *Journal of Applied Physiology*, *126*(2), 278-285.
- Shadmehr, R., Huang, Helen J., & Ahmed, Alaa A. (2016, 2016/07/25/). A Representation of Effort in Decision-Making and Motor Control. *Current Biology*, *26*(14), 1929-1934. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.05.065>
- Shahar, R. B., Kizony, R., & Nota, A. (1998). Validity of the Purdue Pegboard Test in assessing patients after traumatic hand injury. *Work*, *11*(3), 315-320. <https://doi.org/10.3233/wor-1998-11308>
- Shibasaki, H., & Hallett, M. (2006). What is the Bereitschaftspotential? *Clinical Neurophysiology*, *117*(11), 2341-2356. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.04.025>
- Sidhu, S. K., Cresswell, A. G., & Carroll, T. J. (2013, 2013/06/01). Corticospinal Responses to Sustained Locomotor Exercises: Moving Beyond Single-Joint Studies of Central Fatigue. *Sports Medicine*, *43*(6), 437-449. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0020-6>
- Siemionow, V., Yue, G., Ranganathan, V., Liu, J., & Sahgal, V. (2000, 09/01). Relationship between motor activity-related cortical potential and voluntary muscle activation. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, *133*, 303-311. <https://doi.org/10.1007/s002210000382>

- Smirmaul, B. P. C. (2014). Feedback from group III/IV muscle afferents is not the sensory signal for perception of effort. *Experimental physiology*, 99(5), 835-835.
- Smith, M. R., Marcora, S., & Coutts, A. J. (2015). Mental fatigue impairs intermittent running performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 47(8), 1682-1690.
- Smith, S. A., Querry, R. G., Fadel, P. J., Gallagher, K. M., Strömstad, M., Ide, K., Raven, P. B., & Secher, N. H. (2003). Partial blockade of skeletal muscle somatosensory afferents attenuates baroreflex resetting during exercise in humans. *The Journal of Physiology*, 551(3), 1013-1021. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2003.01013.x>
- Spring, J. N., Place, N., Borrani, F., Kayser, B., & Barral, J. (2016, 2016-June-01). Movement-Related Cortical Potential Amplitude Reduction after Cycling Exercise Relates to the Extent of Neuromuscular Fatigue [Original Research]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10(257). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00257>
- Steele, J. (2021). *What is (perception of) effort? Objective and subjective effort during attempted task performance*. <https://doi.org/10.31234/osf.io/kbyhm>
- Steele, J., & Fisher, J. (2018). Effort, discomfort, group III/IV afferents, bioenergetics, and motor unit recruitment. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 50(8), 1718.
- Steinhardt, M., & Dishman, R. (1989, 07/01). Reliability and Validity of Expected Outcomes and Barriers for Habitual Physical Activity. *Journal of occupational medicine. : official publication of the Industrial Medical Association*, 31, 536-546. <https://doi.org/10.1097/00043764-198906000-00011>
- Talairach, J., Bancaud, J., Geier, S., Bordas-Ferrer, M., Bonis, A., Szikla, G., & Rusu, M. (1973, 1973/01/01/). The cingulate gyrus and human behaviour. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 34(1), 45-52. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0013-4694\(73\)90149-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0013-4694(73)90149-1)
- Taylor, J. L., Amann, M., Duchateau, J., Meeusen, R., & Rice, C. L. (2016). 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>
- Thoroughman, K. A., & Shadmehr, R. (1999, Oct 1). Electromyographic correlates of learning an internal model of reaching movements. *J Neurosci*, 19(19), 8573-8588. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.19-19-08573.1999>
- Utter, A. C., Kang, J., & Roberston, R. J. . (2007). Perceived exertion. ACSM Current Comment.

- Utter, A. C., ROBERTSON, R. J., NIEMAN, D. C., & KANG, J. (2002). Children's OMNI Scale of Perceived Exertion: walking/running evaluation. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(1), 139-144. [https://journals.lww.com/acsm-msse/Fulltext/2002/01000/Children\\_s\\_OMNI\\_Scale\\_of\\_Perceived\\_Exertion\\_.21.aspx](https://journals.lww.com/acsm-msse/Fulltext/2002/01000/Children_s_OMNI_Scale_of_Perceived_Exertion_.21.aspx)
- Vasylenko, O., Gorecka, M. M., & Rodríguez-Aranda, C. (2018). Manual dexterity in young and healthy older adults. 2. Association with cognitive abilities. *Developmental Psychobiology*, 60(4), 428-439. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/dev.21618>
- Viana, B. F., Pires, F. O., Inoue, A., Micklewright, D., & Santos, T. M. (2016, Mar). Correlates of Mood and RPE During Multi-Lap Off-Road Cycling. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 41(1), 1-7. <https://doi.org/10.1007/s10484-015-9305-x>
- Vøllestad, N. K. (1997, Jun 27). Measurement of human muscle fatigue. *J Neurosci Methods*, 74(2), 219-227. [https://doi.org/10.1016/s0165-0270\(97\)02251-6](https://doi.org/10.1016/s0165-0270(97)02251-6)
- Wang, J., Lum, P. S., Shadmehr, R., & Lee, S. W. (2021). Perceived effort affects choice of limb and reaction time of movements. *Journal of Neurophysiology*, 125(1), 63-73. <https://doi.org/10.1152/jn.00404.2020>
- Watson, P., Hasegawa, H., Roelands, B., Piacentini, M. F., Looverie, R., & Meeusen, R. (2005). Acute dopamine/noradrenaline reuptake inhibition enhances human exercise performance in warm, but not temperate conditions. *The Journal of Physiology*, 565(3), 873-883. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2004.079202>
- Weiten, W. (2010). *Psychology: Themes and Variations: Themes and Variations*. Wadsworth/Cengage Learning. <https://books.google.ca/books?id=sILajOhJpOsC>
- Williams, J. G., Eston, R., & Furlong, B. (1994). Cert: A Perceived Exertion Scale for Young Children. *Perceptual and Motor Skills*, 79(3\_suppl), 1451-1458. <https://doi.org/10.2466/pms.1994.79.3f.1451>
- Williams, J. G., & Eston, R. G. (1989, 1989/09/01). Determination of the Intensity Dimension in Vigorous Exercise Programmes with Particular Reference to the Use of the Rating of Perceived Exertion. *Sports Medicine*, 8(3), 177-189. <https://doi.org/10.2165/00007256-198908030-00004>
- Williamson, J. W., Fadel, P. J., & Mitchell, J. H. (2006, Jan). New insights into central cardiovascular control during exercise in humans: a central command update. *Exp Physiol*, 91(1), 51-58. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2005.032037>

- Williamson, J. W., McColl, R., Mathews, D., Mitchell, J. H., Raven, P. B., & Morgan, W. P. (2001). Hypnotic manipulation of effort sense during dynamic exercise: cardiovascular responses and brain activation. *Journal of Applied Physiology*, *90*(4), 1392-1399. <https://doi.org/10.1152/jappl.2001.90.4.1392>
- Wilson, L. B., Andrew, D., & Craig, A. D. (2002). Activation of Spinobulbar Lamina I Neurons by Static Muscle Contraction. *Journal of Neurophysiology*, *87*(3), 1641-1645. <https://doi.org/10.1152/jn.00609.2001>
- Wilson, L. B., & Hand, G. A. (1997, Apr). The pressor reflex evoked by static contraction: neurochemistry at the site of the first synapse. *Brain Res Brain Res Rev*, *23*(3), 196-209. [https://doi.org/10.1016/s0165-0173\(96\)00019-7](https://doi.org/10.1016/s0165-0173(96)00019-7)
- Woodworth, R. S. (1899). *The accuracy of voluntary movement* Macmillan Co.]. /z-wcorg/. New York; London.
- Wright, R. A. (1996). Brehm's theory of motivation as a model of effort and cardiovascular response. In *The psychology of action: Linking cognition and motivation to behavior*. (pp. 424-453). The Guilford Press.
- Wüthrich, T. U. A. E., Elisabeth C A Spengler, Christina M. (2014, 1 August 2014). Locomotor and diaphragm muscle fatigue in endurance athletes performing time-trials of different durations [Journal Article]. *European Journal of Applied Physiology*, *114*(Springer), 1619-1633, Article zora:171983. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00421-014-2889-7>
- Yang, C., Leitkam, S., & Côté, J. (2019, 12/31). Effects of different fatigue locations on upper body kinematics and inter-joint coordination in a repetitive pointing task. *PLOS ONE*, *14*, e0227247. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227247>
- Zénon, A., Sidibè, M., & Olivier, E. (2015). Disrupting the Supplementary Motor Area Makes Physical Effort Appear Less Effortful. *The Journal of Neuroscience*, *35*, 8737 - 8744.
- Zhai, S. (2004, 2004/12/01/). Characterizing computer input with Fitts' law parameters—the information and non-information aspects of pointing. *International Journal of Human-Computer Studies*, *61*(6), 791-809. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.09.006>
- Zhai, S., Kong, J., & Ren, X. (2004). Speed-accuracy tradeoff in Fitts' law tasks: on the equivalency of actual and nominal pointing precision. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, *61*(6), 823–856. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.09.007>
- Zhao, W., Martin, A. D., & Davenport, P. W. (2003). Magnitude estimation of inspiratory resistive loads by double-lung transplant recipients. *Journal of Applied Physiology*, *94*(2), 576-582. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00564.2002>



Zinoubi, B., Zbidi, S., Vandewalle, H., Chamari, K., & Driss, T. (2018). Relationships between rating of perceived exertion, heart rate and blood lactate during continuous and alternated-intensity cycling exercises. *Biology of sport*, 35(1), 29-37. <https://doi.org/10.5114/biolSport.2018.70749>

Zourdos, M. C., Klemp, A., Dolan, C., Quiles, J. M., Schau, K. A., Jo, E., Helms, E., Esgro, B., Duncan, S., Garcia Merino, S., & Blanco, R. (2016, Jan). Novel Resistance Training-Specific Rating of Perceived Exertion Scale Measuring Repetitions in Reserve. *J Strength Cond Res*, 30(1), 267-275. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000001049>