

Influence de la fatigue mentale sur les performances physiques

Vianney Rozand et Romuald Lepers

CAPS UMR1093, INSERM, Univ. Bourgogne-Franche Comté, F-21000 Dijon, France

Reçu le 24 septembre 2015 – Accepté le 12 novembre 2015

Résumé. La fatigue mentale est un état psychobiologique vécu par l'ensemble des individus après avoir réalisé une tâche cognitive intense et/ou prolongée, qui se caractérise par une sensation d'épuisement et de manque d'énergie. Si la fatigue mentale altère les fonctions cognitives comme l'attention ou la planification de l'action, elle peut également avoir des effets délétères sur les performances physiques. Dans cette revue, nous décrivons les avancées récentes relatives à l'effet de la fatigue mentale sur les performances physiques. Nous nous focaliserons plus particulièrement sur trois types d'exercices physiques : 1) les exercices globaux dynamiques, tels que le cyclisme ou la course à pied ; 2) les exercices analytiques, comme une contraction sous-maximale soutenue jusqu'à épuisement ou une contraction maximale volontaire d'un groupe musculaire donné ; et 3) les tâches de pointage, pouvant être illustrées par le conflit vitesse-précision. Enfin, nous présenterons les structures cérébrales potentiellement impliquées dans cette interaction entre fatigue mentale et performances physiques.

Mots clés : Tâche cognitive prolongée, endurance, force maximale volontaire, contrôle moteur, perception de l'effort, questionnaires psychologiques

Abstract. Influence of mental fatigue on physical performance.

Mental fatigue is a psychobiological state experienced by all people after realizing an hard and/or prolonged cognitive task, and is characterized by a subjective feeling of tiredness and lack of energy. Mental fatigue alters cognitive functions like attention or action planning, but can also alter physical performances in some cases. In this review, we describe recent progresses about the influence of mental fatigue on physical performances. We focus on three physical exercises: 1) global dynamic exercises, such as cycling or running; 2) local exercises, like sub-maximal contraction until exhaustion or maximal voluntary contraction of single limb; and 3) pointing tasks, well-illustrated by the speed-accuracy trade-off. Finally, we present the cerebral structures that may be involved in the interaction between mental fatigue and physical performance.

Key words: Prolonged cognitive task, endurance, maximal voluntary force, motor control, perceived exhaustion, psychological questionnaires

1 Introduction

La fatigue mentale est un état psychobiologique caractérisé par une sensation subjective d'épuisement et de manque d'énergie (Boksem & Tops, 2008). Elle apparaît après avoir réalisé une tâche cognitive de manière intense et/ou prolongée. À ce jour, aucune source neuro-physiologique objective n'a été précisément associée à la présence de fatigue mentale. La fatigue mentale est quantifiée de manière subjective par des échelles ou des questionnaires psychologiques qui évaluent l'état mental de l'individu. Les tests les plus couramment utilisés sont le Brunel Mood Scale (Terry, Lane, & Fogarty, 2003),

le National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (Hart & Staveland, 1988), ou l'échelle visuelle analogique. Lors de ces questionnaires, les sujets quantifient leurs sensations sur des échelles numériques. Chaque test permet de mesurer des sensations spécifiques, comme l'humeur, la difficulté de l'effort fourni, ou tout simplement la fatigue perçue.

Il a été montré que la fatigue mentale avait des effets délétères sur les fonctions cognitives (Boksem & Tops, 2008; Lorist, Boksem, & Ridderinkhof, 2005; Van Der Linden & Eling, 2006). En présence de fatigue mentale, il devient par exemple plus difficile de maintenir son attention sur les informations pertinentes

sans être perturbé par les stimuli de l'environnement (Boksem, Meijman, & Lorist, 2005; Lorist *et al.*, 2000; Van Der Linden & Eling, 2006). De plus, les corrections ou ajustements de la réponse suite à des erreurs deviennent moins fréquents et de moins bonne qualité (Boksem, Meijman, & Lorist, 2006; Lorist *et al.*, 2005). La préparation et la planification de l'action sont également détériorées, entraînant une augmentation du nombre d'erreurs (Boksem *et al.*, 2006; Lorist *et al.*, 2000). Cependant, la capacité à réaliser des tâches automatisées semble maintenant malgré la fatigue mentale (Hockey, 1997).

Le physiologiste italien Angelo Mosso avait, dès la fin du 19^e siècle, mis en évidence des effets délétères de la fatigue mentale sur les performances physiques (Mosso, 1891). En effet, Mosso avait observé que ses collègues professeurs présentaient une plus faible endurance musculaire après avoir accordé de longues conférences orales. Cette étude comportementale n'avait cependant pas permis de connaître les raisons de la diminution des performances physiques. Ensuite, pendant plus d'un siècle, aucune étude ne s'est intéressée aux possibles interactions entre la fatigue mentale et les performances physiques. Il a fallu attendre les années 2000 pour que des chercheurs s'intéressent de nouveau à cette problématique, et notamment le Professeur Samuele Marcora qui mis en évidence lors d'une étude pionnière une diminution du temps d'endurance en cyclisme lorsque les individus étaient mentalement fatigués (Marcora, Staiano, & Manning, 2009). Les interactions entre fatigue mentale et performances physiques intéressent pourtant de multiples domaines : sportif (ex. courir un marathon après avoir répondu à des interviews); militaire (ex. déplacement des troupes suite à une période de vigilance prolongée); industriel (ex. l'ouvrier doit réfléchir puis utiliser des machines), etc.

Cette revue de littérature fait l'état de l'ensemble des connaissances scientifiques concernant l'influence de la fatigue mentale sur les performances physiques. À ce jour, les études réalisées sur ce thème ont portées principalement sur trois types d'exercices physiques, détaillées dans des parties distinctes (Tab. 1) : i) des exercices dynamiques globaux du corps et les performances d'endurance lors d'exercices de cyclisme ou de course à pied; ii) des exercices analytiques d'un groupe musculaire (extenseurs du genou, muscles fléchisseurs du coude) comme la production de force maximale ou des tâches d'endurance de force lors de contractions sous-maximales; iii) et plus récemment des mouvements de pointage dirigés vers une cible. Dans une dernière partie, nous présenterons les structures cérébrales qui pourraient être impliquées dans les interactions entre fatigue mentale et performances physiques.

2 Exercices globaux dynamiques

Une grande partie des études ayant porté sur les interactions entre fatigue mentale et performances physiques

ont choisi d'analyser les performances d'endurance, et notamment lors d'exercices globaux dynamiques.

L'étude princeps est sans aucun doute celle de Marcora et ses collaborateurs en 2009 (Marcora *et al.*, 2009) qui ont étudié les performances d'endurance sur ergocycle (temps limite à 80 % de leur puissance maximale aérobie) suite à la réalisation pendant 90 min d'une tâche cognitive mentalement fatigante (AX Continuous Performance Task, AX-CPT) *versus* 90 min de visionnage d'un film qui n'engendrait aucune demande cognitive. Les paramètres physiologiques (fréquence cardiaque, consommation d'oxygène, ventilation, concentration de lactate, etc.) et psychologiques (humeur, motivation, et perception de l'effort) furent mesurés dans les deux cas. Le principal résultat de cette étude montre que le temps d'endurance était significativement plus court (-15 %) lorsque les sujets étaient mentalement fatigués. Cependant, aucune modification physiologique ne pouvait expliquer ce résultat, les changements cardiorespiratoires liés à l'exercice étant similaires dans les deux conditions. Seule la perception de l'effort pendant l'exercice de pédalage subséquent était supérieure suite à la fatigue mentale en comparaison de la situation contrôle. La perception de l'effort, définie comme l'expérience consciente de la sensation d'épuisement, est connue pour être le résultat de l'interprétation par le cerveau des retours sensoriels (Gardner & Martin, 2000) et/ou de la décharge corollaire (Brooks, Allen, & Proske, 2013). Avec la fatigue mentale, les sujets avaient donc la sensation de produire un effort plus important comparé à la condition contrôle, bien que l'intensité de l'exercice soit identique. Ils atteignaient leur niveau maximal de perception de l'effort plus tôt et se désengageaient donc plus rapidement de la tâche.

L'altération de la relation entre la perception de l'effort et l'intensité de l'effort réel suite à la fatigue mentale a aussi été étudiée avec une approche inverse, c'est-à-dire en analysant les changements de l'intensité de l'exercice choisie par le sujet pour une perception de l'effort donné. Ainsi, dans leur étude, Brownsberger, Edwards, Crowther, & Cottrell (2013) ont demandé à des sujets de choisir librement la puissance de pédalage lors d'un exercice de cyclisme de 10 min correspondant à un effort perçu comme facile (11/20 sur l'échelle de Borg) et un effort difficile (15/20 sur l'échelle de Borg); ceci avant et après avoir réalisé un exercice mentalement fatigant (AX-CPT pendant 90 min). Les auteurs ont observé que, quelque soit la difficulté de l'exercice (facile ou difficile), les sujets choisissaient délibérément une puissance plus faible lorsqu'ils étaient mentalement fatigués. Ces résultats corroborent bien ceux de Marcora *et al.* (2009) suggérant que la relation entre la perception de l'effort et l'intensité de l'exercice est altérée en cas de fatigue mentale.

La fatigue mentale altère également les performances d'endurance lors d'un exercice de type « contre-la-montre » (Pageaux, Lepers, Dietz, & Marcora, 2014). Dans l'étude de Pageaux *et al.* (2014), la distance à parcourir était fixée au départ (5 km en course à pied sur tapis roulant) et la vitesse était régulée par le sujet

Tableau 1. Résumé des publications ayant étudié l'effet de la fatigue mentale sur les performances physiques. AX-CPT = AX *Continuous Performance Task*. RPE = *Rate of Perceived Exertion* (perception de l'effort). PMA = Puissance Maximale Aérobie. CMV = Contraction Maximale Volontaire.

Auteurs	Tâche mentale	Caractéristiques de l'exercice	Altération de la performance physique	Ampleur
Exercices globaux				
Brownsberger <i>et al.</i> (2013)	AX-CPT (90 min)	Cyclisme (RPE 11 et 15)	Oui	-16 %
Marcora <i>et al.</i> (2009)	AX-CPT (90 min)	Cyclisme (80 % de PMA)	Oui	-15 %
Pageaux <i>et al.</i> (2014)	Test de Stroop (30 min)	Course à pied (5 km)	Oui	-5 %
Smith <i>et al.</i> (2015)	AX-CPT (90 min)	Course à pied (< 50 % effort maximal) Course à pied (> 50 % effort maximal)	Oui Non	-14 %
Exercices analytiques				
<i>Endurance de force</i>				
Bray <i>et al.</i> (2008)	Test de Stroop (3 min 40)	Serrage de poignée (50 % de CMV)	Oui	-23 %
Graham <i>et al.</i> (2014)	Imagerie motrice (3 min)	Serrage de poignée (50 % de CMV)	Oui	-21 %
Keller-Ross <i>et al.</i> (2014)	Calcul mental (pendant la contraction)	Flexion du coude (20 % de CMV)	Oui (hommes) Oui (femmes)	-10 % -19 %
Pageaux <i>et al.</i> (2013)	AX-CPT (90 min)	Extension du genou (20 % de CMV)	Oui	-13 %
Pereira <i>et al.</i> (2015a)	Calcul mental (pendant la contraction)	Flexion du coude (20 % de CMV)	Non (hommes âgés) Oui (femmes âgées)	-24 % -9 %
Yoon <i>et al.</i> (2009)	Calcul mental (pendant la contraction)	Flexion du coude (20 % de CMV)	Oui (hommes) Oui (femmes)	-27 %
<i>Force maximale volontaire</i>				
Bray <i>et al.</i> (2012)	Test de Stroop (22 min)	Serrage de poignée	Oui	-11 %
Martin <i>et al.</i> (2015)	AX-CPT (90 min)	Extension du genou	Non	
Pageaux <i>et al.</i> (2013)	AX-CPT (90 min)	Extension du genou	Non	
Rozand, Lebon, <i>et al.</i> (2014)	Imagerie motrice (20 min)	Flexion du coude	Non	
Rozand, Pageaux, <i>et al.</i> (2014)	Test de Stroop (27 min)	Extension du genou	Non	
Tâches de pointage				
Rozand, Lebon, Papaxanthis, <i>et al.</i> (2015)	Test de Stroop (90 min)	Pointage réel	Oui	+ 4 %
Rozand, <i>et al.</i> (2016)	Imagerie motrice (30 min)	Pointage imaginé Pointage réel	Oui Oui	+ 12 % +4 %

lui-même avec la consigne de terminer l'exercice le plus rapidement possible. Suite à un exercice cognitif prolongé (Test de Stroop pendant 30 min) induisant une fatigue mentale, les sujets choisissaient délibérément une vitesse plus faible, et leur performance était donc altérée par rapport à la condition contrôle. La seule différence observée entre les deux conditions étaient encore une perception de l'effort plus importante lors de l'exercice de course à pied en cas de fatigue mentale (Pageaux *et al.*, 2014). Ces résultats demanderaient à être confirmés sur une tâche écologique (ex. contre la montre en cyclisme sur route).

Certains travaux se sont aussi intéressés aux exercices avec des changements d'allure. Pour évaluer les effets de la fatigue mentale sur un exercice se rapprochant le plus possible d'un match de sport collectif, Smith, Marcora, Coutts (2015) ont conçu un protocole de course à pied intermittent comprenant des périodes de marche, de jogging, de course, de course rapide et de sprint pendant 45 min. Ainsi, il était possible de discriminer les performances pour différents niveaux d'intensité lors d'un même exercice. Ces auteurs ont observé que la fatigue mentale, engendrée par la réalisation de l'AX-CPT pendant 90 min, impactait négativement la vitesse lors des courses à faible intensité (inférieure à 50 % de la vitesse lors d'un sprint), mais n'avait aucun effet sur les courses à allure rapide et les sprints. Selon ces auteurs, la perception de l'effort serait aussi responsable de cette baisse de performance à faible intensité. Contrairement aux efforts d'endurance, les efforts à haute intensité d'une durée de quelques secondes seraient affectés prioritairement par la fatigue neuromusculaire, mais très peu par la fatigue mentale.

L'étude des effets de la fatigue mentale sur les performances lors d'exercices intermittents, comme celle de Smith *et al.* (2015), semble pertinente au regard des nombreuses activités sportives avec variations d'allure et mériterait d'être approfondie. Il serait intéressant d'étudier la capacité à répéter des efforts à intensité élevée en présence de fatigue mentale, en testant par exemple la variation du nombre de répétitions maximales lors d'un exercice de course à pied du type 30–30 (*i.e.* 30 s à vitesse maximale aérobie –30 s de repos), ce type de protocole étant souvent utilisé lors d'entraînements aérobie.

3 Exercices analytiques

3.1 Endurance de force

Les effets de la fatigue mentale ont également été étudiés lors d'exercices locaux (ex. contractions isométriques mono-articulaires) notamment pour des tâches d'endurance musculaire. Ce type d'exercice, même s'il ne reproduit pas le type de contractions musculaires rencontrées lors de conditions écologiques, permet l'analyse des différents paramètres neuromusculaires pendant la tâche et immédiatement après la fin d'un exercice (Lepers, 2004, 2010; Rozand, Grosprêtre, Stapley, & Lepers, 2015).

Cela est impossible lors d'un exercice global du corps pour lequel il y a toujours un temps de transfert, par exemple, entre le tapis roulant ou l'ergocycle et le système de mesure de la force musculaire.

Bray, Martin Ginis, Hicks, & Woodgate (2008) ont comparé le temps d'endurance lors d'un exercice isométrique de serrage de la main jusqu'à épuisement précédé ou non d'une tâche cognitive prolongée (Test de Stroop pendant 3 min 40 s). Le temps d'endurance était réduit (–23 %) suite à une tâche mentalement fatigante en comparaison de la tâche contrôle de simple lecture. Ces résultats ont été confirmés lors d'un exercice d'extension du genou en condition isométrique correspondant à 20 % de la force maximale volontaire mené jusqu'à épuisement (Pageaux, Marcora, & Lepers, 2013). Dans cette étude, le temps d'endurance isométrique était diminué de 12 % suite à un exercice cognitif prolongé de 90 min (AX-CPT) en comparaison de la situation contrôle (visionnage d'un film). Pourtant, les altérations neuromusculaires suite à la contraction isométrique fatigante étaient similaires dans les deux cas, suggérant que la fatigue mentale n'exacerbe pas la fatigue musculaire. À l'instar des exercices globaux dynamiques, la réduction du temps d'endurance lors de contractions isométriques est associée à une augmentation plus marquée de la perception de l'effort suite à la fatigue mentale, induisant un désengagement prématuré du sujet envers la tâche (Pageaux *et al.*, 2013).

Cette diminution des performances d'endurance suite à la fatigue mentale ne semble pas spécifique à la tâche cognitive prolongée utilisée. Les deux principales tâches cognitives utilisées à ce jour dans la littérature sont l'AX-CPT et le test de Stroop. Récemment, Graham, Sonne, & Bray (2014) ont utilisé une tâche cognitive particulière : l'imagerie motrice. L'imagerie motrice correspond à l'imagination d'une action sans production de mouvement (Decety *et al.*, 1994). Il est maintenant reconnu qu'un entraînement de ce type peut améliorer les performances motrices (Feltz & Landers, 1983; Gentili, Han, Schweighofer, & Papaxanthis, 2010) ou la force maximale (Ranganathan, Siemionow, Liu, Sahgal, & Yue, 2004; Yue & Cole, 1992). Cependant, une séance intense d'imagerie motrice semble également altérer les performances d'endurance musculaire (Graham *et al.*, 2014). Dans leur étude, Graham *et al.* (2014) ont demandé aux sujets d'effectuer une contraction des muscles de la main à 20 % de leur force maximale jusqu'à épuisement, avant et après avoir imaginé ce même exercice pendant 3 min. La diminution du temps à épuisement étaient plus importante après avoir imaginé la contraction en comparaison à une condition contrôle où les sujets se reposaient pendant 3 min. Cependant, la perception de l'effort n'a pas été mesurée lors de la tâche d'endurance, limitant la comparaison avec les études précédentes. Selon les auteurs, l'imagination du mouvement entraînerait une consommation importante des ressources cognitives, ce qui rendrait plus difficile l'autorégulation de la force musculaire lors de la tâche physique subséquent (Baumeister, 2002), et entraînerait un désengagement

précoce de la tâche. L'utilisation de l'imagerie comme tâche cognitive fatigante mériterait d'être approfondie au regard de son usage lors de séances d'entraînement ou de réhabilitation. De plus, les effets d'une séance d'imagerie motrice prolongée sur les performances lors d'exercices globaux de type cyclisme ou course à pied n'ont pas été étudiés à ce jour.

3.2 Force maximale volontaire

Contrairement à un exercice d'endurance musculaire qui nécessite de réguler le niveau de force produit, la contraction maximale volontaire exige une intensité maximale de contraction pendant une durée très courte (environ 3 à 5 s). L'étude de Bray, Graham, Martin Ginis, & Hicks (2012) est la première à avoir examiné les effets possibles d'une tâche cognitive prolongée sur la force maximale. Dans cette étude, les sujets réalisaient un test de Stroop pendant 22 min, et effectuaient un exercice de serrage maximal de la main toutes les 3 min. Les résultats ont montré une réduction de la force maximale volontaire ($\sim 10\%$), significative seulement à la fin de la tâche cognitive. Cependant, le faible nombre de mesures physiologiques et de données psychologiques au cours de cette étude ne permettait pas de proposer des mécanismes explicatifs de la perte de force induite. Une principale limite de cette étude était l'absence de feedback de force donné aux sujets, ce qui pouvait diminuer la motivation des sujets à produire une contraction maximale (Enoka, 1995; Gandevia, 2001). Depuis, de nouvelles études de ce type ont été réalisées en permettant aux sujets d'avoir un feedback sur leur performance de force/puissance en temps réel (Martin, Thompson, Keegan, Ball, & Rattray, 2015; Pageaux *et al.*, 2013; Rozand, Lebon, Papaxanthis, & Lepers, 2014; Rozand, Lebon, Stapley, Papaxanthis, & Lepers, 2016). Cependant, les résultats de ces différentes études contredisent ceux de Bray *et al.* (2012) puisqu'ils ne montrent aucune altération de la force maximale volontaire suite par exemple à un exercice cognitif soutenu (AX-CPT) réalisé pendant 90 min (Martin *et al.*, 2015; Pageaux *et al.*, 2013). Malheureusement dans ces deux études, les mesures de la force maximale volontaire n'étaient pas réalisées immédiatement après la fin de la tâche cognitive. En effet, la contraction maximale volontaire était effectuée 10 min après l'arrêt de l'exercice mental dans l'étude de Pageaux *et al.* (2013), et après trois sauts en contrebas dans l'étude de Martin *et al.* (2014). Pendant ce délai, il est possible que les individus aient récupéré, annihilant les effets que pourraient avoir la fatigue mentale sur la capacité de production de force maximale.

Pour éviter ces biais méthodologiques, Rozand, Pageaux, *et al.* (2014) ont reproduit l'expérience de Bray *et al.* (2012) sur les muscles extenseurs du genou, en permettant aux sujets d'avoir un feedback sur leur performance de force, et en quantifiant le niveau d'activation des sujets par la technique de stimulation surimposée; (Merton, 1954) lors de la contraction maximale

volontaire. Contrairement aux résultats de l'étude de Bray *et al.* (2012) sur les muscles de la main, aucune diminution de la force maximale volontaire des muscles extenseurs du genou n'a été observée suite à une tâche de Stroop réalisée pendant 27 min. De plus, le niveau d'activation volontaire, représentant l'ampleur de la commande motrice descendante, restait maximal tout au long du protocole attestant l'absence de fatigue centrale. Le système nerveux central reste donc capable d'activer maximalelement les muscles malgré la fatigue mentale. Ce résultat a été confirmé lors d'une étude ayant utilisé la technique de stimulation magnétique transcranienne pour mesurer le niveau d'activation cortical (Rozand, Lebon, *et al.*, 2014). Dans cette étude utilisant l'imagerie motrice prolongée pour induire une fatigue mentale, le niveau d'activation volontaire restait maximal malgré l'activation répétée des aires motrices. Ce résultat suggère que l'ensemble de la voie corticospinale n'était pas altérée par une séance prolongée d'imagerie motrice et a fortiori par la fatigue mentale.

La majorité des études, à ce jour, tend à montrer que la capacité de production de force maximale semble préservée avec la fatigue mentale (Martin *et al.*, 2015; Pageaux *et al.*, 2013; Rozand, Lebon, *et al.*, 2014; Rozand, Pageaux, *et al.*, 2014). De plus, la capacité du système nerveux central à activer maximalelement les muscles ne semble pas non plus altérée par la fatigue mentale, démontrant l'absence de lien entre fatigue mentale et fatigue centrale. Cependant, l'absence d'effet de la fatigue mentale sur la force maximale doit être confirmée lors de tâches cognitives de durée beaucoup plus longue (> 30 min).

4 Tâches de pointage

L'effet de la fatigue mentale sur le contrôle du mouvement a été peu étudié. Le contrôle du mouvement correspond à la capacité à diriger le corps et les membres dans le but de faire un mouvement déterminé. Il est mis en jeu dans de nombreuses activités de la vie quotidienne, comme attraper une tasse ou écrire sur un clavier d'ordinateur, qui requièrent une motricité fine et un haut niveau de traitement cognitif (Fischer, 1980). Dans le cas de mouvements rapides et précis dirigés vers une cible, la vitesse du mouvement est prédite par la loi de Fitts (Fitts & Peterson, 1964; Fitts, 1954), régissant le conflit vitesse-précision. Ce paradigme postule qu'une augmentation de la vitesse du mouvement entraîne automatiquement une diminution de la précision, et inversement. Ainsi, pour aller vers une cible le plus rapidement et le plus précisément possible, un choix doit être fait entre la vitesse et la précision (Woodworth, 1899). Le conflit vitesse-précision est modèle descriptif extrêmement robuste de la coordination visuo-manuelle (Bonnetblanc, 2008).

Il a récemment été montré qu'en présence de fatigue mentale, la relation entre vitesse et précision était conservée mais les mouvements étaient ralentis quelle que

soit la difficulté de la tâche (Rozand, Lebon, Papaxanthis, & Lepers, 2015). Cette diminution de la vitesse est observée pour les mouvements réels mais aussi pour les mouvements imaginés. Lors de l’imagination du mouvement, le système nerveux central planifie ainsi un mouvement plus lent sans feedback sensoriel, suggérant que le SNC anticiperait les effets de la fatigue mentale. Des résultats similaires ont été observés en présence de fatigue neuromusculaire. Missenard, Mottet, and Perrey (2009) ont montré que la durée du mouvement augmentait avec la fatigue neuromusculaire quelle que soit la difficulté de la tâche, à cause d’une diminution globale des phases d’accélération et de décélération. En utilisant un modèle de contrôle optimal, les auteurs ont observé que le bruit dans la commande motrice augmentait avec la fatigue musculaire, entraînant une plus grande variabilité dans la position finale du mouvement. Pour garantir le succès dans la tâche, les participants étaient obligés de ralentir leur mouvement. Dans le cas de la fatigue mentale, le bruit augmenterait également dans la commande motrice, et le système nerveux central intégrerait ce paramètre pour planifier un mouvement plus lent et ainsi réussir la tâche (Harris & Wolpert, 1998).

De la même manière, la durée d’un mouvement de pointage augmente lorsque la fatigue mentale est engendrée par une séance intense d’imagerie motrice. Rozand, *et al.* (2016) ont mis en évidence que la durée du mouvement augmentait d’environ 5 % après avoir imaginé 100 mouvements de pointage. La récupération était cependant très rapide, puisque la durée du mouvement réel était identique aux valeurs initiales dès le second essai. De plus, les effets de la fatigue mentale pouvaient être contrecarrés par la réalisation régulière de mouvements réels. Ainsi, lorsque des mouvements réels étaient exécutés tous les 10 essais imaginés, la durée du mouvement restait stable.

À ce jour, les deux études de Rozand et ses collaborateurs (Rozand, *et al.*, 2015 ; Rozand, Lebon, Papaxanthis, *et al.*, 2015) sont les seules à avoir analysé l’influence de la fatigue mentale sur le contrôle volontaire de mouvements dirigés vers une cible. D’autres études se sont intéressées aux fluctuations de la force musculaire, indicateur de la stabilité, lors de contractions sous-maximales isométriques réalisées simultanément avec une tâche cognitive (Pereira, Spears, Schlinder-Delap, Yoon, Harkins, *et al.*, 2015 ; Pereira, *et al.*, 2015 ; Vanden Noven *et al.*, 2014). Les fluctuations de force augmentent lorsque les sujets réalisent une tâche cognitivement demandante pendant une contraction sous-maximale (Keller-Ross *et al.*, 2014 ; Yoon *et al.*, 2009). Cette diminution de stabilité, ou augmentation de fluctuation de la force, est plus marquée chez les personnes âgées que chez les sujets jeunes (Vanden Noven *et al.*, 2014) et à faibles niveaux de force (Pereira, *et al.*, 2015). La variabilité de la fréquence de décharge des unités motrices pouvant contribuer à la fluctuation de la force à des faibles niveaux de force (Jesunathadas, Klass, Duchateau, & Enoka, 2012 ; Negro, Holobar, & Farina, 2009 ; Tracy, Maluf,

Stephenson, Hunter, & Enoka, 2005), l’augmentation de cette variabilité chez les personnes âgées pourrait être exacerbée à ces mêmes niveaux de force lorsqu’une tâche cognitive concomitante est réalisée (Pereira, Spears, *et al.*, 2015).

Alors que la capacité à contrôler le mouvement est utilisée dans de nombreuses actions de la vie quotidienne, sa sensibilité à la fatigue mentale n’a que très peu été étudiée. Seuls des mouvements simples de pointage ont été réalisés. Il reste donc une multitude de conditions à explorer, comme des mouvements mettant en jeu le corps entier, et notamment le contrôle de l’équilibre.

5 Structures cérébrales potentiellement impliquées dans la fatigue mentale

La fatigue mentale a fait l’objet de nombreuses études de neuro-imagerie afin de déterminer les structures cérébrales impliquées (Chaudhuri & Behan, 2000 ; Cook, O’Connor, Lange, & Steffener, 2007 ; Tanaka, Ishii, & Watanabe, 2014). Ainsi, différentes techniques d’imagerie cérébrales ont été utilisées, comme l’imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, la magnétoencéphalographie, l’électroencéphalographie ou encore la spectroscopie proche infrarouge. Face à la grande diversité des observations en fonction des études et des techniques utilisées, il semble difficile de déterminer un marqueur objectif de la fatigue mentale. En effet, la réalisation d’une tâche mentalement fatigante n’active pas une seule région cérébrale mais un large réseau d’aires situées dans l’ensemble des lobes du cerveau (frontal, temporal, pariétal et occipital ; Cook *et al.*, 2007 ; Ishii *et al.*, 2013 ; Lim *et al.*, 2010 ; Nakagawa *et al.*, 2013 ; Shigihara *et al.*, 2013 ; Suda *et al.*, 2009), ainsi que dans des structures sous-corticales tels que le mésencéphale (Tanaka *et al.*, 2014), les ganglions de la base (Chaudhuri & Behan, 2000) et le cervelet (Ishii, Tanaka, & Watanabe, 2014).

Certains travaux ont suggéré que le mécanisme de la fatigue mentale pourrait impliquer une réduction ou une défaillance des projections dopaminergiques, c’est-à-dire une altération de la transmission de la dopamine, neurotransmetteur présent dans le système nerveux central, d’une région cérébrale à une autre (Boksem *et al.*, 2006 ; Chaudhuri & Behan, 2000). Cette défaillance affecterait de manière prépondérante les ganglions de la base et le cortex cingulaire antérieur (CCA ; Lorist & Tops, 2003 ; Lorist *et al.*, 2005). Les ganglions de la base sont depuis longtemps reconnus comme une structure impliquée dans les aspects motivationnels du comportement et des récompenses (Nauta, 1986 ; Schultz, 2000). Le CCA est, quant à lui, une région du cortex préfrontal, située autour du corps calleux, qui est impliquée dans l’attention et la mémoire de travail (Cabeza & Nyberg, 2000 ; Habeck *et al.*, 2005), le processus de motivation et de récompense (Schultz, 2000 ; Walton, Bannerman, Alterescu, & Rushworth, 2003) et

la perception de l'effort (Williamson *et al.*, 2001, 2002; Williamson, Fadel, & Mitchell, 2006). Chez les animaux, une lésion de cette aire corticale affecte la prise de décision lors d'un effort (Rudebeck, Walton, Smyth, Bannerman, & Rushworth, 2006; Walton, Kennerley, Bannerman, Phillips, & Rushworth, 2006; Walton *et al.*, 2003). Ganglions de la base et CCA seraient interconnectés, puisque les fonctions de contrôle et de décision de l'action du CCA s'appuieraient sur les projections dopaminergiques provenant des ganglions de la base (Holroyd & Coles, 2002). Une altération de ce réseau suite à une tâche mentalement fatigante pourrait donc expliquer l'arrêt prématuré d'un exercice d'endurance. En effet, les auteurs ayant étudié les performances d'endurance ont tous rapporté une perception de l'effort plus importante avec la fatigue mentale (Brownsberger *et al.*, 2013; Marcora *et al.*, 2009; Pageaux *et al.*, 2013; Smith *et al.*, 2015). Le rapport coût/bénéfice de la continuité de l'exercice deviendrait plus rapidement défavorable au maintien de l'effort (Marcora *et al.*, 2009). Selon le modèle psychobiologique proposé par Marcora (2008), l'arrêt plus précoce de l'exercice suite à la fatigue mentale ne serait pas dû à une défaillance neuromusculaire, centrale ou périphérique, mais à des mécanismes impliquant certaines structures cérébrales comme le CCA et les ganglions de la base. L'effet principal serait une augmentation plus marquée de la perception de l'effort produit au cours de l'exercice, et donc une atteinte plus rapide du niveau de tolérance maximale à l'effort.

En plus d'une altération de la perception de l'effort, la diminution de l'activité du CCA durant une tâche mentalement fatigante provoquerait un dysfonctionnement du contrôle cognitif, de la préparation des réponses, ainsi que de la planification et du contrôle de l'action (Boksem *et al.*, 2006; Lorist *et al.*, 2000; Paus, 2001; van der Linden, Frese, & Meijman, 2003). De plus, l'activité du CCA semble également réduite durant un effort physique si l'individu est mentalement fatigué (Tanaka *et al.*, 2014). Dans une tâche nécessitant un contrôle fin du mouvement, il paraît très probable que l'altération de la préparation et de la planification du mouvement augmente l'apparition d'erreurs. Cependant, le système nerveux central semble capable de prendre en compte et d'anticiper cette dégradation des performances en réduisant la vitesse du mouvement (Rozand *et al.*, 2015). Grâce à cette adaptation, la précision des réponses est conservée mais le mouvement est plus lent.

6 Conclusion

La fatigue mentale a des effets différents selon le type de performance physique réalisée. Si la capacité de production de force maximale volontaire semble conservée suite à une fatigue mentale, les performances lors de tâches d'endurance globales ou locales, ainsi que le contrôle du mouvement lors de tâches de pointage sont altérées. La fatigue mentale ne semble pas affecter directement le cortex

moteur primaire et la commande motrice, mais plutôt des structures telles que le cortex cingulaire antérieur et les ganglions de la base, responsables des processus de motivation, de perception de l'effort ou encore de la prise de décision. L'ensemble de ces résultats peut avoir des implications dans le monde sportif, militaire ou professionnel, où la recherche de performances maximales est une des principales préoccupations. Des recherches futures devront éclaircir le rôle des différentes aires cérébrales dans le processus de fatigue mentale, et notamment les connexions entre les régions cérébrales impliquées. Elles devront également préciser les effets sur les performances de la durée et de la nature des tâches cognitives induisant une fatigue mentale, ainsi que les délais de récupération.

Bibliographie

- Baumeister, R.F. (2002). Ego depletion and self-control failure: An energy model of the self's executive function. *Self and Identity*, 1 (2), 129–136.
- Boksem, M.A.S., & Tops, M. (2008). Mental fatigue: costs and benefits. *Brain Research Reviews*, 59 (1), 125–139.
- Boksem, M.A., Meijman, T.F., & Lorist, M.M. (2005). Effects of mental fatigue on attention: an ERP study. *Brain research. Cognitive Brain Research*, 25 (1), 107–116.
- Boksem, M.A., Meijman, T.F., & Lorist, M.M. (2006). Mental fatigue, motivation and action monitoring. *Biological Psychology*, 72 (2), 123–132.
- Bonnetblanc, F. (2008). Conflit vitesse-précision et loi de Fitts. *Science & Motricité*, 1 (63), 63–82.
- Bray, S.R., Graham, J.D., Martin Ginis, K.A., & Hicks, A.L. (2012). Cognitive task performance causes impaired maximum force production in human hand flexor muscles. *Biological Psychology*, 89 (1), 195–200.
- Bray, S.R., Martin Ginis, K.A., Hicks, A.L., & Woodgate, J. (2008). Effects of self-regulatory strength depletion on muscular performance and EMG activation. *Psychophysiology*, 45 (2), 337–343.
- Brooks, J., Allen, T.J., & Proske, U. (2013). The senses of force and heaviness at the human elbow joint. *Experimental Brain Research*, 226 (4), 617–29.
- Brownsberger, J., Edwards, A., Crowther, R., & Cottrell, D. (2013). Impact of mental fatigue on self-paced exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 34 (12), 1029–1036.
- Cabeza, R., & Nyberg, L. (2000). Imaging cognition II: An empirical review of 275 PET and fMRI studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12 (1), 1–47.
- Chaudhuri, A., & Behan, P.O. (2000). Fatigue and basal ganglia. *Journal of the Neurological Sciences*, 179 (S 1-2), 34–42.
- Cook, D.B., O'Connor, P.J., Lange, G., & Steffener, J. (2007). Functional neuroimaging correlates of mental fatigue induced by cognition among chronic fatigue syndrome patients and controls. *NeuroImage*, 36 (1), 108–122.

- Decety, J., Perani, D., Jeannerod, M., Bettinardi, V., Tadary, B., Woods, R., Mazziotta, J.C., Fazio, F. (1994). Mapping motor representations with positron emission tomography. *Nature*, *371* (6498), 600–602.
- Enoka, R.M. (1995). Mechanisms of muscle fatigue: Central factors and task dependency. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *5* (3), 141–149.
- Feltz, D.L., & Landers, D.M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance: a meta-analysis. *Journal of Sport Psychology*, *5* (1), 25–57.
- Fischer, K.W. (1980). A theory of cognitive development: The control and construction of hierarchies of skills. *Psychological Review*, *87* (6), 477–531.
- 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.
- Fitts, P.M., & Peterson, J.R. (1964). Information capacity of discrete motor responses. *Journal of Experimental Psychology*, *67*, 103–12.
- Gandevia, S.C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological Reviews*, *81*(4), 1725–1789.
- Gardner, E., & Martin, J. (2000). Coding of sensory information. In E. Kandel, J. Schwartz, & T. Jessel (Eds.), *Principles of Neural Science* (pp. 421–429), McGraw-Hil.
- Gentili, R., Han, C.E., Schweighofer, N., & Papaxanthis, C. (2010). Motor learning without doing: trial-by-trial improvement in motor performance during mental training. *Journal of Neurophysiology*, *104* (2), 774–783.
- Graham, J.D., Sonne, M.W.L., & Bray, S.R. (2014). It wears me out just imagining it! Mental imagery leads to muscle fatigue and diminished performance of isometric exercise. *Biological Psychology*, *103C*, 1–6.
- Habeck, C., Rakitin, B.C., Moeller, J., Scarmeas, N., Zarahn, E., Brown, T., & Stern, Y. (2005). An event-related fMRI study of the neural networks underlying the encoding, maintenance, and retrieval phase in a delayed-match-to-sample task. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, *23* (2-3), 207–20.
- Harris, C.M., & Wolpert, D.M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, *394* (6695), 780–784.
- Hart, S.G., & Staveland, L.E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*, *52*, 139–183.
- Hockey, G.R.J. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, *45* (1-3), 73–93.
- Holroyd, C.B., & Coles, M.G.H. (2002). The neural basis of human error processing: reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological Review*, *109* (4), 679–709.
- Ishii, A., Tanaka, M., Shigihara, Y., Kanai, E., Funakura, M., & Watanabe, Y. (2013). Neural effects of prolonged mental fatigue: A magnetoencephalography study. *Brain Research*, *1529*, 105–112.
- Ishii, A., Tanaka, M., & Watanabe, Y. (2014). Neural mechanisms of mental fatigue. *Reviews in the Neurosciences*, *25*, 1–11.
- Jesunathadas, M., Klass, M., Duchateau, J., & Enoka, R.M. (2012). Discharge properties of motor units during steady isometric contractions performed with the dorsiflexor muscles. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, *112* (11), 1897–905.
- Keller-Ross, M.L., Pereira, H.M., Pruse, J., Yoon, T., Schlinder-Delap, B., Nielson, K.A., & Hunter, S.K. (2014). Stressor-induced increase in muscle fatigability of young men and women is predicted by strength but not voluntary activation. *Journal of Applied Physiology*, *116*, 767–78.
- Lepers, R. (2004). Aetiology and time course of neuromuscular fatigue during prolonged cycling exercises. *Science & Motricité*, *52*, 83–107.
- Lepers, R. (2010). Interest and limits of percutaneous nerve electrical stimulation in the evaluation of muscle fatigue. *Science & Motricité*, *70*, 31–37.
- Lim, J., Wu, W., Wang, J., Detre, J., Dinges, D., & Rao, H. (2010). Imaging brain fatigue from sustained mental workload: an ASL perfusion study of the time-on-task effect. *NeuroImage*, *49* (4), 3426–3435.
- Lorist, M.M., Klein, M., Nieuwenhuis, S., De Jong, R., Mulder, G., & Meijman, T.F. (2000). Mental fatigue and task control: planning and preparation. *Psychophysiology*, *37* (5), 614–625.
- Lorist, M.M., & Tops, M. (2003). Caffeine, fatigue, and cognition. *Brain and Cognition*, *53* (1), 82–94.
- Lorist, M.M., Boksem, M.A., & Ridderinkhof, K.R. (2005). Impaired cognitive control and reduced cingulate activity during mental fatigue. *Cognitive Brain Research*, *24* (2), 199–205.
- Marcora, S.M. (2008). Do we really need a central governor to explain brain regulation of exercise performance? *European Journal of Applied Physiology*, *104* (5), 929–931.
- Marcora, S.M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, *106* (3), 857–864.
- Martin, K., Thompson, K.G., Keegan, R., Ball, N., & Rattray, B. (2015). Mental fatigue does not affect maximal anaerobic exercise performance. *European Journal of Applied Physiology*, *115* (4), 715–725.
- Merton, P.A. (1954). Voluntary strength and fatigue. *The Journal of Physiology*, *123*, 553–564.
- Missenard, O., Mottet, D., & Perrey, S. (2009). Adaptation of motor behavior to preserve task success in the presence of muscle fatigue. *Neuroscience*, *161* (3), 773–786.
- Mosso, A. (1891). *La fatica*. Milano: Treves.
- Nakagawa, S., Sugiura, M., Akitsuki, Y., Hosseini, S.M.H., Kotozaki, Y., Miyauchi, C.M., Yomogida, Y., Yokoyama R, Takeuchi H, Kawashima R. (2013). Compensatory effort parallels midbrain deactivation during mental fatigue: an fMRI study. *PLoS One*, *8* (2), e56606.

- Nauta, W. (1986). Circuitous connections linking cerebral cortex, limbic system, and corpus striatum. *The limbic system: Functional organization and clinical disorders* (pp. 43–54) Raven Pres.
- Negro, F., Holobar, A., & Farina, D. (2009). Fluctuations in isometric muscle force can be described by one linear projection of low-frequency components of motor unit discharge rates. *The Journal of physiology*, *587* (Pt 24), 5925–59238.
- Pageaux, B., Marcora, S.M., & Lepers, R. (2013). Prolonged mental exertion does not alter neuromuscular function of the knee extensors. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *45* (12), 2254–2264.
- Pageaux, B., Lepers, R., Dietz, K.C., & Marcora, S.M. (2014). Response inhibition impairs subsequent self-paced endurance performance. *European Journal of Applied Physiology*, *114* (5), 1095–1105.
- Paus, T. (2001). Primate anterior cingulate cortex: where motor control, drive and cognition interface. *Nature Reviews Neuroscience*, *2* (6), 417–424.
- Pereira, H.M., Spears, V.C., Schlinder-Delap, B., Yoon, T., Harkins, A., Nielson, K.A., Hoeger Bement, M., Hanter, S.K. *et al.* (2015). Sex Differences in Arm Muscle Fatigability With Cognitive Demand in Older Adults. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, *473* (8), 2568–2577.
- Pereira, H.M., Spears, V.C., Schlinder-Delap, B., Yoon, T., Nielson, K.A., & Hunter, S.K. (2015). Age and sex differences in steadiness of elbow flexor muscles with imposed cognitive demand. *European Journal of Applied Physiology*, *115* (6), 1367–1379.
- Ranganathan, V.K., Siemionow, V., Liu, J.Z., Sahgal, V., & Yue, G.H. (2004). From mental power to muscle power - Gaining strength by using the mind. *Neuropsychologia*, *42* (7), 944–956.
- Rozand, V., Lebon, F., Papaxanthis, C., & Lepers, R. (2014). Does a mental-training session induce neuromuscular fatigue? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *46* (10), 1981–1989.
- Rozand, V., Pageaux, B., Marcora, S.M., Papaxanthis, C., & Lepers, R. (2014). Does mental exertion alter maximal muscle activation? *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 755.
- Rozand, V., Grosprêtre, S., Stapley, P.J., & Lepers, R. (2015). Assessment of neuromuscular function using percutaneous electrical nerve stimulation. *Journal of Visualized Experiments*, (103), doi: 10.3791/52974.
- Rozand, V., Lebon, F., Papaxanthis, C., & Lepers, R. (2015). Effect of mental fatigue on speed-accuracy trade-off. *Neuroscience*, *297*, 219–230.
- Rozand, V., Lebon, F., Stapley, P.J., Papaxanthis, C., & Lepers, R. (2016). A prolonged motor imagery sessions alter imagined and actual movement durations: potential implications for neurorehabilitation. *Behavioural Brain Research*, *297*, 67–75.
- Rudebeck, P.H., Walton, M.E., Smyth, A.N., Bannerman, D.M., & Rushworth, M.F.S. (2006). Separate neural pathways process different decision costs. *Nature Neuroscience*, *9* (9), 1161–8.
- Schultz, W. (2000). Multiple reward signals in the brain. *Nature reviews. Neuroscience*, *1* (3), 199–207.
- Shigihara, Y., Tanaka, M., Ishii, A., Kanai, E., Funakura, M., & Watanabe, Y. (2013). Two types of mental fatigue affect spontaneous oscillatory brain activities in different ways. *Behavioral and brain functions: BBF*, *9* (1), 2. Behavioral and Brain Functions.
- Smith, M.R., Marcora, S.M., & Coutts, A.J. (2015). Mental fatigue impairs intermittent running performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *47* (8), 1682–1690.
- Suda, M., Fukuda, M., Sato, T., Iwata, S., Song, M., Kameyama, M., & Mikuni, M. (2009). Subjective feeling of psychological fatigue is related to decreased reactivity in ventrolateral prefrontal cortex. *Brain Research*, *1252*, 152–160.
- Tanaka, M., Ishii, A., & Watanabe, Y. (2014). Neural effect of mental fatigue on physical fatigue: A magnetoencephalography study. *Brain Research*, *1542*, 49–55.
- Terry, P.C., Lane, A.M., & Fogarty, G.J. (2003). Construct validity of the Profile of Mood States - Adolescents for use with adults. *Psychology of Sport and Exercise*, *4* (2), 125–139.
- Tracy, B.L., Maluf, K.S., Stephenson, J.L., Hunter, S.K., & Enoka, R. M. (2005). Variability of motor unit discharge and force fluctuations across a range of muscle forces in older adults. *Muscle & Nerve*, *32* (4), 533–540.
- Van der Linden, D., Frese, M., & Meijman, T.F. (2003). Mental fatigue and the control of cognitive processes: Effects on perseveration and planning. *Acta Psychologica*, *113*(1), 45–65.
- Van Der Linden, D., & Eling, P. (2006). Mental fatigue disturbs local processing more than global processing. *Psychological Research*, *70* (5), 395–402.
- Vanden Noven, M.L., Pereira, H.M., Yoon, T., Stevens, A.A., Nielson, K. A., & Hunter, S.K. (2014). Motor variability during sustained contractions increases with cognitive demand in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *6*, 97.
- Walton, M.E., Bannerman, D.M., Alterescu, K., & Rushworth, M.F.S. (2003). Functional specialization within medial frontal cortex of the anterior cingulate for evaluating effort-related decisions. *The Journal of Neuroscience*, *23* (16), 6475–6479.
- Walton, M.E., Kennerley, S.W., Bannerman, D.M., Phillips, P.E.M., & Rushworth, M.F.S. (2006). Weighing up the benefits of work: behavioral and neural analyses of effort-related decision making. *Neural Networks*, *19* (8), 1302–1314.
- Williamson, J.W., Fadel, P.J., & Mitchell, J.H. (2006). New insights into central cardiovascular control during exercise in humans: a central command update. *Experimental Physiology*, *91* (1), 51–58.

- 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 (Bethesda, Md.: 1985)*, *90*, 1392–1399.
- Williamson, J.W., McColl, R., Mathews, D., Mitchell, J.H., Raven, P.B., & Morgan, W.P. (2002). Brain activation by central command during actual and imagined handgrip under hypnosis. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, *92* (3), 1317–24.
- Woodworth, R. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review*, *3*, 1–106.
- Yoon, T., Keller, M.L., Schlinder Delap, B., Harkins, A., Lepers, R., & Hunter, S.K. (2009). Sex differences in response to cognitive stress during a fatiguing contraction. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, *107* (5), 1486–1496.
- Yue, G., & Cole, K.J. (1992). Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. *Journal of Neurophysiology*, *67* (5), 1114–1123.