



**Université de Montréal**

**Effet d'une pré-sollicitation maximale isométrique des muscles stabilisateurs sur  
la coordination intermusculaire lors d'un exercice pluriarticulaire épuisant.**

**par  
Évelyne Chicoine**

**Département de kinésiologie  
Faculté des études supérieures et postdoctorales**

Mémoire présenté au Département de kinésiologie  
en vue de l'obtention du grade de Maîtrise  
en Sciences de l'activité physique  
option physiologie de l'exercice

Août 2013

© Évelyne Chicoine, 2013

## Résumé

**Introduction:** Les stratégies d'optimisation de la performance chez les athlètes sont de plus en plus exploitées par les entraîneurs et préparateurs physiques. La potentialisation de post-activation (PAP) est reconnue comme étant un phénomène pouvant mener à une augmentation des performances. L'objectif de la présente étude était de donc décrire les effets d'une pré-sollicitation à la hanche sur la coordination inter-musculaire et la performance au cours d'un exercice épuisant.

**Méthodes:** Six athlètes de patins de vitesse de courte piste (3 de sexe masculin et 3 de sexe féminin; âge:  $20.2 \pm 2.8$  ans; moyenne  $\pm$  écart-type) ont exécuté aléatoirement un exercice qui consistait en 2 séries de 9 blocs de squats sautés maximaux, entre-coupés d'un squat isométrique d'une durée de 5 secondes sans pré-sollicitation préalable (CON) et avec une tâche de pré-sollicitation unilatérale de squat isométrique (EXP) contre une barre fixe de 2x3 secondes. Le pic de puissance moyen, l'amplitude et la fréquence moyenne d'EMG, et la vitesse et l'accélération angulaires des premiers et derniers blocs étaient enregistrés.

**Résultats:** La pré-sollicitation isométrique maximale des membres inférieurs n'a pas amélioré de manière significative la performance de sauts et la coordination des muscles stabilisateurs à la hanche. La fréquence spectrale moyenne a néanmoins témoigné de l'implication de stratégies compensatoires du membre inférieur gauche en réponse à la fatigue.

**Conclusion:** La pré-sollicitation des stabilisateurs à la hanche n'augmenterait pas la performance de squats répétés. Par contre, la fréquence moyenne du grand fessier et du tibial antérieur gauche ont suggéré meilleure résistance à la fatigue des muscles du membre inférieur non-dominant avec une pré-sollicitation. Les résultats de la présente étude indiquent donc la pertinence de considérer la pré-sollicitation dans un objectif de performance et de réadaptation sachant que l'asymétrie est omniprésente chez les athlètes et qu'elle est impliquée dans le taux élevé de blessures enregistré chez cette population.

**Mots-clés:** potentialisation de post-activation, électromyographie, fatigue, coordination

## **Abstract**

**Introduction:** Strategies in order to optimize athlete's performances are commonly used by coaches and trainers. Post-activation potentiation (PAP), occurring after a pre-activation, is known to be a phenomenon that can lead to an increase in force and power production and thus, performance. The aim of the present study was to describe the effects of a hip stabilizers pre-activation on multi-segment coordination and performance during a fatiguing exercise.

**Method:** Six short-track speed skating athletes (3 males and 3 females; age:  $20.2 \pm 2.8$  years; data reported as mean  $\pm$  SD) participate in the study were they had to execute 2 sets of 9 blocks of 6 maximal squat jumps with 5 s isometric squats between blocks and 5 min rest between sets without (CON) or with (EXP) a 2x3s unilateral isometric squats against a fixed bar potentiating exercise 5 min before to the first set of 9 blocks intending to target the lower body hip stabilizers, flexors and extensors. Jumping average peak power, EMG amplitude, median frequency, angular velocity and acceleration were measured. The first and last blocks of jumps were recorded for each set.

**Results:** There were no significant difference between conditions, as results showed an overall fatigue state. However, mean frequency showed compensating strategies in left leg muscles in response to fatigue.

**Conclusion:** Hip stabilizers isometric pre-activation did not improve overall performance and coordination on jump squats. However, gluteus maximus and anterior tibialis showed a an improved fatigue resistance in non-dominant leg with pre-activation. Results from this study suggest that pre-activation protocols, while they produce no significant impact on performance, could be relevant for reducing lower-limb movement asymmetry during athlete training and as such, contribute to injury prevention and rehabilitation.

**Keywords:** postactivation potentiation, electromyography, fatigue, coordination

## Table des matières

Résumé .....	i
Abstract .....	ii
Liste des figures .....	vi
Liste des tableaux.....	viii
Liste des abréviations.....	ix
Remerciements .....	x
Introduction .....	1
A) La pré-sollicitation musculaire et la potentialisation de post-activation.....	2
B) Le phénomène de potentialisation de post-activation .....	3
i. Description et étude du phénomène.....	3
ii. Mécanismes électrophysiologiques sous-jacents et caractéristiques .....	8
ii.a) Phosphorylation des chaînes légères de myosine.....	8
ii.b) Augmentation de l'activité des motoneurones.....	10
ii.c) Propriété contractile supplémentaire du muscle (catchlike property)..	11
ii.d) Angle de pennation des muscles.....	12
iii. Des résultats équivoques: vaste éventail de méthodologies.....	13
iv. Modalités et variables influençant la PAP.....	15
iv. a) Contraction isométrique.....	15
iv. b) Contraction dynamique.....	17
iv. c) Durée et fréquence de la pré-sollicitation.....	17
iv. d) Volume et intensité de la pré-sollicitation.....	22
iv. e) Temps de récupération.....	23
v. Différence selon le niveau d'entraînement et la typologie musculaire.....	33
vi. Évidences quant à l'amélioration de la performance chez le sujet entraîné....	33
vii. Rôles et applications dans la performance sportive.....	36
C) Coordination inter-musculaire: rôle de la PAP dans la prévention des blessures et dans l'amélioration des performances.....	42
i. Étude de la coordination musculaire dans la prévention des blessures.....	42
ii. La stabilité à la hanche dans la prévention des blessures.....	43
D) Le squat comme exercice de pré-sollicitation du bas du corps.....	46

E) La fatigue neuromusculaire.....	53
i. Définition.....	53
ii. Principaux mécanismes expliquant l'apparition de la fatigue musculaire.....	56
iii. Effets de la fatigue sur la coordination inter-musculaire: effets sur les patrons moteurs.....	56
iv. Le signal EMG en réponse à la fatigue musculaire .....	59
iv. a) Le signal EMG en réponse à un exercice fatigant sous-maximal....	60
iv. b) Le signal EMG en réponse à un exercice fatigant maximal.....	60
v. La fatigue et le risque de blessure.....	63
vi. Fatigue et spécificité d'entraînement.....	64
F) La potentialisation de post-activation et la fatigue .....	66
i. Étude des manifestations de la fatigue dans le muscle squelettique .....	66
G) Justification et objectifs du projet de recherche.....	71
H) Hypothèses de travail.....	73
<b>Effect of lower body pre-activation on multi-segment coordination and performance during repeated vertical jumps.....</b>	<b>75</b>
Abstract .....	76
A) Introduction.....	78
B) Methods .....	81
Participants.....	81
Materials.....	82
Exercise protocol.....	83
Data processing.....	84
Statistics.....	85
C) Results.....	85
D) Discussion.....	88
E) Practical applications .....	95
F) Conclusion.....	96
References.....	98
Acknowledgments.....	108
Figures and tables.....	109
APPENDIX 1.....	116

DISCUSSION GÉNÉRALE.....	117
H) Rappel des résultats.....	117
I) Limites.....	117
J) Applications pratiques .....	119
K) Avenues de recherche et perspectives.....	119
L) Contribution personnelle au projet.....	120
M) Conclusion.....	121
Références bibliographiques.....	124

## Liste des figures

Figure 1: Modèle de la relation entre la performance explosive, PAP et la fatigue suite à une activité de pré-sollicitation.....	4
Figure 2: Puissance mécanique (A) et hauteur de saut (B) pendant un exercice de sauts (countermovement jumps) avant (baseline) et après un exercice de pré-sollicitation.....	6
Figure 3: Modifications de la force maximale concentrique après différentes durées de pré-sollicitation.....	19
Figure 4: Effets d'un protocole de pré-sollicitation unique et multiple.....	21
Figure 5: Puissance mécanique lors d'une extension du genou.....	26
Figure 6: Effets de la pré-sollicitation sur la performance après un temps de récupération entre 0 et 3 minutes.....	27
Figure 7: Effets de la pré-sollicitation sur la performance après un temps de récupération entre 4 et 7 minutes.....	28
Figure 8: Effets de la pré-sollicitation sur la performance après un temps de récupération entre 8 et 12 minutes.....	29
Figure 9: Effets de la pré-sollicitation sur la performance après un temps de récupération de 16 minutes et plus .....	30
Figure 10: Temps de récupération selon le niveau d'entraînement dans l'observation des effets induits par la PAP.....	32
Figure 11: Différence de la réponse à une pré-sollicitation chez des athlètes en puissance, endurance et des sujets non-entraînés.....	35



Figure 12: Hauteur du CMJ atteinte suite à un protocole dans pré-sollicitation et avec pré-sollicitation.....	38
Figure 13: Puissance mécanique à différents moments (min) après une pré-sollicitation des membres inférieurs (A) et supérieurs (B).....	47
Figure 14: Classement des pourcentages de recrutement du grand fessier par rapport à la contraction maximale isométrique lors de différents exercices.....	49
Figure 15: Classement des pourcentages de recrutement du moyen fessier par rapport à la contraction maximale isométrique lors de différents exercices.....	51
Figure 16: Pic moyen de puissance (a) et puissance moyenne (b) par sprint lors d'une tâche de 10 répétitions de sprints de 6 secondes sur ergocycle entrecoupés de périodes de repos de 30 secondes.....	54
Figure 17: Puissance moyenne par rapport au temps des sprints 1 et 10 lors d'une de 10 répétitions de sprints de 6 secondes sur ergocycle entrecoupés de périodes de repos de 30 secondes.....	55
Figure 18: Pourcentage de diminution de la puissance des muscles extenseurs du genou pendant une contraction maximale volontaire isométrique de 10-s chez des athlètes féminines.....	65

## Liste des tableaux

Tableau 1: Principaux ouvrages traitant des temps de récupération après une tâche de pré-sollicitation..... 24

Tableau 2: Sommaire des études ayant évalué les effets de la pré-sollicitation sur une tâche subséquente..... 40

Tableau 3: Sommaire (suite) des études ayant évalué les effets de la pré-sollicitation sur une tâche subséquente..... 41

## Liste des abréviations

<b>CMJ (Countermovement jump)</b>	Saut en contrebas
<b>EMG</b>	Électromyographie Électromyographique
<b>Fmoy</b>	Fréquence moyenne
<b>ITT</b>	Interpolation de secousse
<b>min</b>	Minute
<b>MVC (Maximal Voluntary Contraction)</b>	Contraction maximale volontaire
<b>PAP (postactivation potentiation)</b>	Potentialisation de 9post-activation
<b>PTP</b>	Potentialisation post-tétanique
<b>RMS (Root Mean Square)</b>	Valeur quadratique moyenne
<b>s</b>	Seconde
<b>TDF</b>	Taux de développement de la force
<b>W</b>	Watts (puissance)

## **Remerciements**

À mon directeur de recherche, Jonathan, merci pour la richesse d'expériences et de connaissances que tu m'as permis d'acquérir et d'avoir cru en moi jusqu'au bout...

À mon co-directeur, David, merci pour ton temps, ton suivi, et surtout, merci pour ton encadrement qui m'a permis d'accomplir des choses que je n'aurais jamais même cru pouvoir comprendre...

À mon ami/collègue/cousin de labo, Fabien, merci de m'avoir accordé autant de temps et de m'avoir si bien accueilli à toutes les fois où j'étais désespérée!

À la Maison Internationale de l'Université de Montréal et au Ministère du loisir et des sports du Québec, merci pour le soutien financier m'ayant permis de réaliser mon séjour de recherche à l'étranger.

Au département de kinésiologie de l'Université de Montréal, merci de m'avoir permis de m'impliquer dans l'enseignement et la formation clinique.

À ma famille (Jeanne et Yvon), merci pour votre support et de croire en moi, depuis mes premiers jours sur les bancs d'école.

À Marc, qui ensoleille mes jours les plus gris, merci pour ta compréhension et ton support inconditionnel.

## **Introduction**

La préparation à l'entraînement physique ou à la compétition peut prendre diverses formes, et ce, en fonction des multiples contextes sportifs et niveaux d'entraînement. La pré-activation, dans les instants précédant une performance sportive, est une sphère de la préparation physique qui est de plus en plus spécialisée et individualisée (Stewart et al., 2003) par la recherche sur les différents mécanismes physiologiques et biomécaniques engendrés pouvant mener à un gain de performance (Brunner-Ziegler et al. 2011; Gelen, 2010; Bishop, 2003).

De ces mécanismes identifiés, la pré-sollicitation musculaire est une méthode de plus en plus courante dans la préparation de l'athlète avant sa performance et chacun prône sa propre recette empirique sans toutefois s'appuyer sur une compréhension complète des mécanismes impliqués. La présence de biais méthodologiques (protocole, échantillon, variables) constitue une source de variation dans l'expression et l'interprétation des signaux électrophysiologiques pouvant expliquer les résultats équivoques rapportés à ce jour dans la littérature (Scott et Docherty 2004).

## **A) La pré-sollicitation musculaire et la potentialisation de post-activation**

La pré-sollicitation musculaire ou pré-activation est caractérisée par une contraction de «conditionnement» quasi-maximale ou maximale d'un groupe musculaire dans les secondes ou minutes qui précèdent une performance physique (French et al., 2003). De par l'influence de l'historique de contraction des muscles (Docherty et Hodgson, 2007; Robbins et Docherty, 2005), cette dernière pourrait engendrer une augmentation de la force et de la quantité de travail pouvant être effectuée immédiatement ou dans un court délai après celle-ci (Tillin et Bishop, 2009; Hodgson et al., 2005; Robbins et Docherty, 2005; Ding et al., 2003; Sale, 2002), phénomène appelé «potentialisation de post-activation» (PAP). Pour le présent manuscrit, l'activité de «conditionnement» sera appelée «pré-sollicitation» puisqu'elle précède l'exécution d'une tâche motrice précise au cours de laquelle la performance est mesurée.

## **B) Le phénomène de potentialisation de post-activation**

### **i. Description et étude du phénomène**

L'amplitude de l'activité électrique obtenue après une secousse musculaire, se définissant comme une contraction musculaire brève en réponse à un potentiel d'action présynaptique, est augmentée suite à une pré-sollicitation qui consiste en une contraction maximale volontaire soutenue ou une contraction provoquée (tétanique) (Hodgson et al., 2005). Suite à une augmentation de la force de la secousse tétanique de basse fréquence (Sale, 2002), on observe une augmentation du taux de développement de la force (TDF) et une diminution du temps jusqu'au pic de force (Hodgson et al., 2005). Cette séquence d'événements localisés appelée «potentialisation de secousse» est le phénomène reconnu et communément appelé «potentialisation de post-activation» (Van Praagh, 2007). Il se manifesterait à deux reprises (fenêtres temporelles) suite à la pré-sollicitation et la gestion de ces fenêtres temporelles serait importante dans l'occurrence ou non des effets de la PAP. La figure 1 illustre l'apparition du phénomène suite à un stimulus de contraction consistant en une contraction isométrique maximale de 10 secondes.

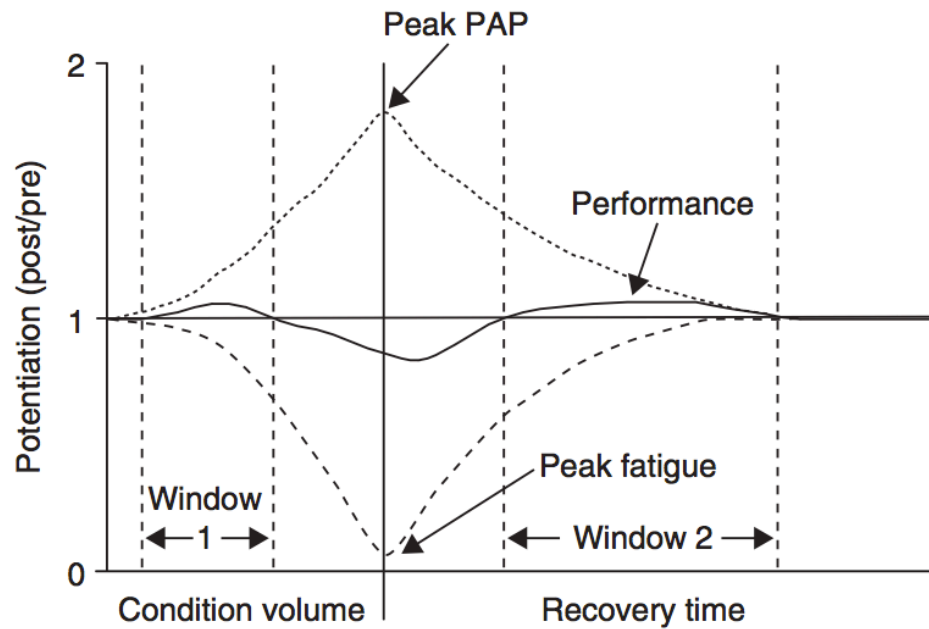


Figure 1. Modèle de la relation entre la performance explosive, la PAP et la fatigue suite à une activité de pré-sollicitation. Tout de suite après une pré-sollicitation (conditionnement) de faible volume, une fenêtre temporelle (window) d'opportunité permet de bénéficier des effets de la PAP. Un volume trop élevé mène à une apparition de fatigue importante, réduisant la performance subséquente. Toutefois, avec un volume de pré-sollicitation optimal et bien géré par rapport au moment de la performance à réaliser, la fatigue se dissipe plus rapidement que les mécanismes de potentialisation qui ont été activés et la performance explosive pourrait ainsi être améliorée. (Tirée de Tillin et Bishop, 2009).



Miyamoto et al. (Miyamoto et Kanehisa, 2012) rapportent cependant que la PAP n'apparaîtrait pas immédiatement après l'activité de pré-sollicitation, et ce, malgré la présence de la potentialisation tétranique. Les résultats rapportés à ce jour illustrent néanmoins que la PAP se manifeste par une augmentation de la stimulation des fibres musculaires et de la force tétranique de basse fréquence suite à un exercice de pré-sollicitation (Sale, 2002). La figure 2 démontre la performance dans le temps lors d'une tâche de saut à contrebas (CMJ) après un exercice de pré-sollicitation de squat arrière. Tout de suite après la pré-sollicitation (15 secondes), la performance est diminuée tandis qu'au fur et à mesure que la fatigue se dissipe, la performance augmente.

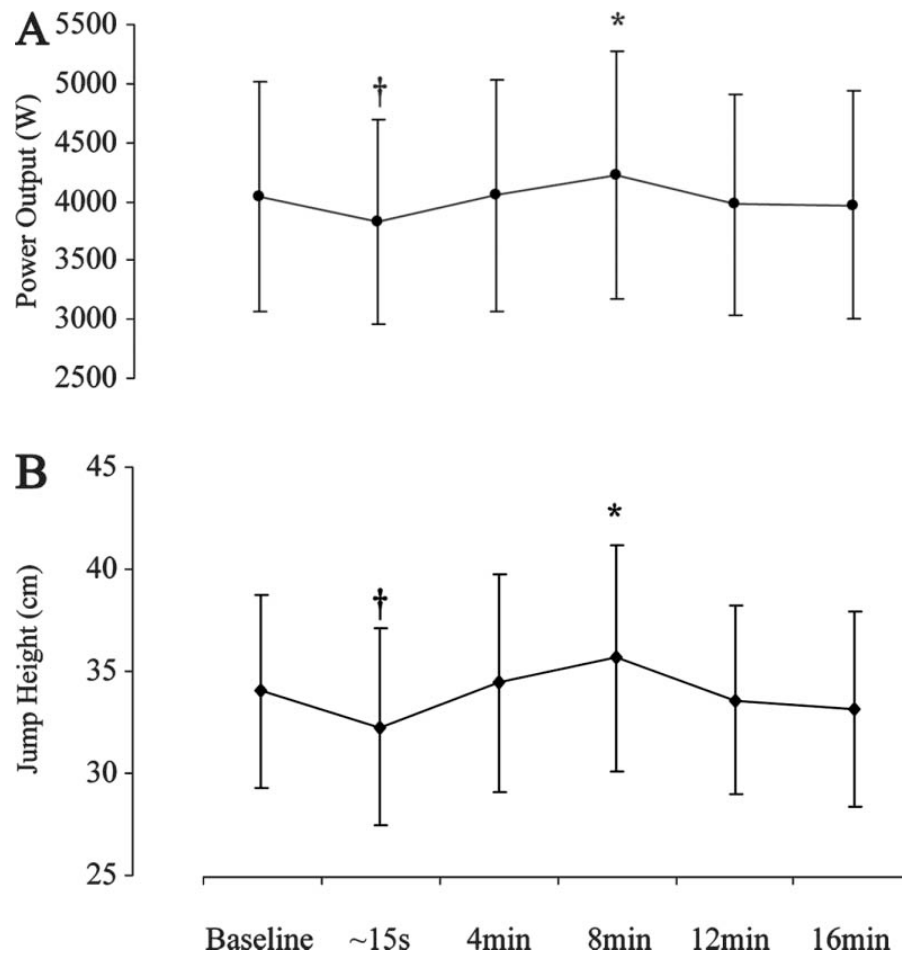


Figure 2. Puissance mécanique (A) et hauteur de saut (B) pendant un exercice de sauts à contrebas (CMJ) avant (baseline) et après un exercice de pré-sollicitation de squat arrière. Le symbole † indique une diminution significative comparativement à l'état initial (baseline), survenant tout de suite après l'effort. Le symbole \* indique une augmentation de la puissance ou de la hauteur du saut significative comparativement à tous les autres points. (Tirée de Kilduff et al., 2011)

La PAP est aussi retrouvée sous l'appellation «potentialisation post-tétanique» (PTP) dans la littérature et aussi connue pour augmenter la force tétanique de basse fréquence et la secousse musculaire après une activité de pré-sollicitation (Sale, 2002). En fait, les deux mécanismes ne diffèrent que par la nature de la contraction de pré-sollicitation. La PAP est issue d'une contraction volontaire alors que la PTP résulte d'une contraction involontaire (stimulation neuromusculaire) (Tillin et Bishop, 2009; Sale, 2002). La potentialisation tétanique est plutôt utilisée dans des protocoles de réadaptation, alors que la pré-sollicitation est induite par stimulation électrique étant donné les différentes limitations des patients (Magalhães et al., 2013; Lorenz et al., 2011). Les manifestations électrophysiologiques étant sensiblement les mêmes pour les deux types de contraction, l'effet potentialisateur d'une contraction se référera au terme PAP au travers du présent manuscrit dans la mesure où le thème principal est associé et appliqué aux performances sportives.

La PAP peut être étudiée en observant les modifications de la force externe lors d'un exercice pluriarticulaire ou en mesurant le niveau d'activation musculaire par la réponse électromyographique (EMG) lors d'un mouvement monoarticulaire (Tillin et Bishop, 2009) ou pluriarticulaire. Finalement, la PAP peut être provoquée par électrostimulation, une contraction volontaire ou des contractions tétaniques intra-musculaires (Ding et al., 2003; Rassier et Macintosh, 2000).

## **ii. Mécanismes électrophysiologiques sous-jacents et caractéristiques**

Bien que certains mécanismes expliquant l'augmentation du taux de développement de la force résultant d'une PAP soient toujours inconnus, les études ont permis de déterminer quelques facteurs clés agissant aux niveaux périphérique, central et musculoquelettique (Seitz, 2011). Ces mécanismes, d'ordre myologique et neurologique, sont connus comme étant principalement: la phosphorylation des chaînes légères de myosine, l'augmentation de l'activité des motoneurones (Cameron, et Bampouras, 2010; Tillin et Bishop, 2009; Esformes et al., 2007; Hodgson et al., 2005; Chiu et al., 2003; Sale, 2002; Young et al., 1998), l'angle de pennation des fibres musculaires (Tillin et Bishop, 2009) ainsi que la propriété contractile supplémentaire (*catchlike*) du muscle, qui consiste en une contraction brève de haute fréquence tout juste avant le début d'une stimulation ou d'une contraction (Frigon et al., 2011; Binder-Macleod et Kesar, 2005).

### **ii. a) Phosphorylation des chaînes légères de myosine**

La contraction du muscle strié a lieu lorsque la liaison du  $Ca^{2+}$  à la tropomyosine rend les sites d'actine du complexe tropomyosine-troponine disponibles aux têtes de myosine. Malgré le fait que le complexe tropomyosine-troponine soit le principal acteur dans la contraction musculaire, les chaînes légères de myosine (*myosin regulatory light chain* - RLC), situées entre la tête et la queue de la molécule de myosine, joueraient un rôle régulateur important dans le processus de contraction musculaire (Szczena et al., 2002).

Selon les travaux de Klug et al. (Klug et al., 1982) et de Moore et al. (Moore et Stull, 1984), l'amplitude de la potentialisation suite à une contraction isométrique serait positivement corrélée à celle de la phosphorylation des chaînes légères de myosine. Lors d'une pré-sollicitation, la MLCK (*myosin regulatory light chain kinase* - kinase des chaînes légères de la myosine) permet de phosphoryler les chaînes légères de myosine (RLC) et rendre le couplage actine-myosine plus sensible au  $\text{Ca}^{2+}$  (Tillin et Bishop, 2009; Hodgson et al., 2005). La MLCK est activée par la liaison de la protéine calmoduline au  $\text{Ca}^{2+}$ , lorsqu'il est libéré par le réticulum endoplasmique pendant la contraction musculaire. Une contraction subséquente serait potentialisée par la modification de la structure de la tête de myosine et par l'augmentation du taux de déplacement des ponts de liaison des molécules de myosine d'une condition statique à une condition de production de force (Tillin et Bishop, 2009; Hodgson et al., 2005). Ces modifications structurelles engendreraient une augmentation de la force qui pourrait durer jusqu'à plusieurs minutes (Esformes et al., 2011). En outre, la phosphorylation des RLC aurait un plus grand effet lorsque les concentrations de  $\text{Ca}^{2+}$  myoplasmiques sont plus faibles, alors que la sensibilité au  $\text{Ca}^{2+}$  est augmentée. Cette modification transitoire en réponse à une secousse ou une contraction tétanique de basse fréquence (Tillin et Bishop, 2009), comme une contraction isométrique (Hodgson et al., 2005), serait suffisante pour activer la MLCK et par conséquent engendrer la PAP (Klug et al., 1982). À l'inverse, l'augmentation de la sensibilité au  $\text{Ca}^{2+}$  reste inchangée lorsque le niveau de  $\text{Ca}^{2+}$  myoplasmique est saturé, comme il en est le cas lors d'une contraction tétanique de haute fréquence (Hodgson et al., 2005; Sale, 2002).

## **ii. b) Augmentation de l'activité des motoneurones**

Les recherches sur l'animal ont montré que les contractions isométriques tétaniques engendrent une élévation de la transmission des potentiels d'action à travers les jonctions synaptiques pouvant durer plusieurs minutes au niveau de la moelle épinière (Hodgson et al., 2005; Güllich et Schmidtbleicher, 1996;). Il en résulte une augmentation des potentiels post-synaptiques lors d'une contraction subséquente (Gossard et al., 1994). En effet, une contraction induite diminuerait le taux d'échec de transmission synaptique d'une activité subséquente par l'entremise de différents processus, dont l'augmentation de la quantité de neurotransmetteurs libérés et la diminution de l'échec de transmission du signal le long de la fibre neurale afférente (Tillin et Bishop, 2009). La diminution de la probabilité d'échec de transmission suivant un stimulus de conditionnement expliquerait ainsi la réalisation d'un effet de PAP (Hirst et al., 1981). L'augmentation de potentiels post-synaptiques résulterait en une plus grande dépolarisation de la membrane des motoneurones alpha ( $\alpha$ ), les rendant plus aptes à franchir le seuil d'excitation pour initier le potentiel d'action et par conséquent, générant la contraction des fibres musculaire de l'unité motrice (Tillin et Bishop, 2009).

Une activité de pré-sollicitation pourrait aussi augmenter le recrutement des motoneurones supérieurs, et donc, la contribution des fibres rapides dans la contraction musculaire. Il en résulterait une amélioration de la performance dans des tâches explosives sollicitant de grandes unités motrices et/ou masses musculaires (Tillin et Bishop, 2009; Güllich et Schmidtbleicher, 1996). Il semblerait que la PAP augmenterait l'amplitude du réflexe-H (réaction réflexe des muscles après l'électrostimulation des fibres sensibles) chez les humains, pouvant ainsi augmenter le recrutement des

motoneurones supérieurs au niveau de la moelle épinière (Tillin et Bishop, 2009; Holtermann et al., 2007). Par contre, d'autres études ont montré que la PAP augmenterait de manière faible le taux de développement de la force isométrique et ne serait pas relié à l'excitabilité du réflex-H, ce dernier reflétant le niveau d'excitabilité neuronale (Hodgson et al., 2008).

### ***ii. c) Propriété contractile supplémentaire du muscle (catchlike property)***

La propriété contractile supplémentaire du muscle squelettique (catchlike) est l'augmentation de la force observée lorsqu'une contraction supplémentaire brève et de haute fréquence a lieu dans un court délai avant le début d'une stimulation sous-tétanique de basse fréquence constante (Frigon et al., 2011; Binder-Macleod et Kesar, 2005). Cette propriété n'est donc pas liée aux jonctions neuromusculaires ni aux axones neuronaux (Binder-Macleod et Kesar, 2005; Lee et al., 1999). Les mécanismes expliquant le développement de force supplémentaire sont l'augmentation de la concentration de  $Ca^{2+}$  sarcoplasmique (Ratkevicius et Quistorff, 2002), principalement, ainsi que l'augmentation de la raideur du muscle par ses propriétés visco-élastiques, surmontant ainsi certains effets associés à la fatigue (qui seront élaborés plus loin dans ce manuscrit) (Binder-Macleod et Kesar, 2005). Plusieurs facteurs expliqueraient l'apparition de ce phénomène, tels que le degré de fatigue et de potentialisation, la proportion de la composition du type de fibres musculaires, le type de contraction ainsi que la longueur du muscle (Binder-Macleod et Kesar, 2005). L'ampleur de ce mécanisme serait supérieur lorsque les fibres sont dans une position raccourcie que lorsqu'elles sont allongées (Binder-Macleod et Kesar, 2005; Lee et al., 1999) et contribuerait davantage à la PAP dans le muscle fatigué (Ratkevicius et Quistorff, 2002)

en présentant des taux plus rapides de montée de la force (Lee et al., 1999). Cette propriété serait d'autant plus importante au niveau des motoneurones lents (*slow-twitch*) que rapides (*fast-twitch*) (Ratkevicius et Quistorff, 2002).

La fatigue est un facteur important pendant la stimulation induisant cette propriété contractile supplémentaire puisque la relation force-fréquence et l'amplitude de l'augmentation due à ce phénomène sont modifiées par celle-ci (Binder-Macleod et Kesar, 2005). En effet, Lee et al. (1999) ont démontré que lors d'une contraction isométrique, la propriété contractile supplémentaire serait efficace dans l'augmentation de la force du quadriceps fatigué (de 9 à 49%) chez l'homme (Lee et al., 1999). Il semblerait que l'augmentation observée serait directement liée à la quantité de fatigue de basse fréquence présente dans le muscle (Binder-Macleod et Kesar, 2005).

Cependant, la propriété contractile supplémentaire n'apporterait qu'un faible avantage à l'amélioration de la performance (Binder-Macleod et Kesar, 2005). Néanmoins, une faible augmentation pourrait avoir un impact important dans des disciplines sportives de haut niveau.

#### **ii. d) Angle de pennation des muscles**

L'angle de pennation des fibres musculaires peut affecter la transmission de force aux tendons et os (Folland et Williams, 2007). Un angle de pennation plus petit permet un levier mécanique plus efficace puisque la direction de la force est davantage dans l'orientation des fibres. Cet avantage pourrait donc contribuer à la PAP dans un objectif d'amélioration de la performance (Tillin et Bishop, 2009)



Bien que les manifestations physiologiques sous-jacentes de la PAP mentionnées ci-haut soient relativement bien décrites (Crewther, et al., 2011; Tillin et Bishop, 2009; Hodgson et al., 2005; Sale, 2002;), les travaux illustrant la contribution de la PAP provoquée par une pré-sollicitation de muscles entièrement ou partiellement isolés dans la réalisation de mouvements pluriarticulaires dynamiques (Baudry et Duchateau, 2007), présentent des résultats équivoques quant au rôle précis, réel et constant sur la performance.

À l'inverse, plusieurs études ont relevé l'impact d'une pré-sollicitation sur l'augmentation de la performance lors de contractions isométriques (Baudry et Duchateau, 2007). Par contre, dans le cadre de tâches sportives, il est indéniable que l'impact de la PAP sur la performance pluriarticulaire dynamique ait davantage l'attention des entraîneurs et préparateurs physiques.

### **iii. Des résultats équivoques: vaste éventail de méthodologies**

Certaines études n'ont démontré aucune amélioration de performance subséquentement à une pré-sollicitation, tant à la suite d'une contraction isométrique (Folland et al., 2008; Robbins et Docherty, 2005) que dynamique (Esformes et al., 2010; Jones et Lees, 2003). La phosphorylation des RLC étant différente chez l'humain et les animaux, la différence entre les types de fibres, le phénomène d'apprentissage de la tâche (Scott et Docherty, 2004) ainsi que le vaste éventail de méthodologies présentes dans la littérature expliqueraient la présence de résultats équivoques (Hodgson et al., 2005; Kilduff et al., 2007). En effet, le type de contraction, l'intensité et le volume de la pré-sollicitation, la période de récupération entre les séries de pré-sollicitation et la

performance, le niveau d'entraînement, la force maximale absolue et la réponse neuromusculaire différente chez les sujets peuvent représenter des sources de biais dans l'étude du phénomène de la PAP (Robbins et Docherty, 2005).

Ces exemples présentent des sources de variation dans l'expression et l'interprétation des signaux électrophysiologiques pouvant expliquer l'absence d'amélioration de la performance suite à une pré-sollicitation (Scott et Docherty, 2004).

Les travaux de Batista et al. (Batista et al., 2011) mentionnent que le niveau d'entraînement et le niveau de force musculaire n'influenceraient pas l'occurrence de la PAP. Il s'agit cependant de résultats contradictoires par rapport aux nombreux articles démontrant les effets bénéfiques liés à la PAP, selon différents facteurs individuels. Ces derniers seront décrits dans les sections qui suivront.

Bien que plusieurs études ne démontrent aucune augmentation ou aucune modification de la performance résultant de la PAP suite à un protocole de pré-sollicitation (Esformes et al., 2011; Khamoui al., 2009a; Folland et al., 2008; Parry et al., 2008; Baker, 2003; Robbins et Docherty, 2005; Scott et Docherty, 2004; Hrysomallis et Kidgell, 2001), aucune d'entre elles n'a enregistré une diminution de performance (Esformes et al., 2011). À titre d'exemple, Khamoui et al. (Khamoui et al., 2009a) n'ont enregistré aucun gain lors d'une performance de 3 sauts verticaux après 2, 3, 4 ou 5 squats arrières. Cependant, la charge représentait 85% du 1RM et cette valeur avait été obtenue en fin de protocole contrôle, ce qui aurait pu diminuer la charge maximale pouvant être soulevée. De plus, les sujets étaient entraînés de manière récréative, ce qui aurait aussi

pu avoir un impact sur la première valeur du 1RM en plus de la réponse aux stimuli subséquents par l'adaptation à l'entraînement et l'apprentissage de la tâche en cours d'étude.

Ainsi, à la lumière des études ci-dessus et des biais énoncés, nous serions donc portés à croire que des protocoles de pré-sollicitation, certes individualisés et prenant en considération les caractéristiques des sujets, pourraient être utilisés dans le cadre de l'entraînement et/ou de compétitions pour le maintien, et/ou l'amélioration des performances, comme il sera discuté dans les sections suivantes.

#### **iv. Modalités et variables influençant la PAP**

Les manifestations de la PAP dépendraient de différentes variables, soient le volume et l'intensité de la pré-sollicitation la période de récupération, le type d'activité suivant celle-ci et les caractéristiques du sujet (Tillin et Bishop, 2009).

De plus, il semblerait que les contractions aient un effet cumulatif dans la production de la PAP (Sale, 2002; Young et al., 1998). Il a aussi été démontré que les effets d'une pré-sollicitation et la répétition d'une activité ont un impact additionnel sur l'amplitude de la PAP (Sale, 2002; Gossen et Sale, 2000).

##### **iv. a) Contraction isométrique**

Il a été démontré que la performance lors d'une seule série est augmentée suite à une activité de pré-sollicitation isométrique et que ce type de contraction aurait plus d'effets que des exercices dynamiques ou isoinertiels (Esformes et al., 2011; Robbins et

Docherty, 2005; Sale, 2002). Par exemple, Esformes et al. (Esformes et al., 2011) ont montré qu'une pré-sollicitation isométrique de 7 secondes avec une flexion de 110° à l'épaule engendrait une augmentation significative du pic de puissance ( $p < 0.038$ ) lors d'une tâche de lancer en position de développé-couché (*bench press throw*). À la suite d'un squat isométrique maximal contre une barre fixe de 3 secondes, Berning et al. (Berning et al., 2010), ont enregistré une augmentation de la performance au saut en contrebas (CMJ) de 2.4 centimètres (5.1% de la puissance) 4 minutes après la pré-sollicitation et de 2.6 cm (5.5% de la puissance) 5 minutes après la pré-sollicitation.

Ces modifications en réponse à une pré-sollicitation viendraient du fait que les contractions isométriques soient davantage liées à l'augmentation de la phosphorylation des RLC, entre autres responsables de la manifestation de la PAP (Moore et Stull, 1984). Par conséquent, la force et le taux de développement de la force seraient augmentés subséquemment à ce type de contraction (Feros et al., 2012; Babault et al., 2008; Hodgson et al., 2005; Güllich et Schmidtbleicher, 1996), résultant en un impact bénéfique lors de tâches dynamiques (Tillin et Bishop, 2009; Rixon et al., 2007; De Ruiter et al., 2006; French et al., 2003).

Rixon et al. (Rixon et al., 2007) ont d'ailleurs étudié l'influence du type de contraction sur l'amplitude de la PAP et ont noté que la contraction isométrique permettait une meilleure manifestation de la PAP que la condition de pré-sollicitation dynamique. Selon les travaux de Esformes et al. (Esformes et al., 2011) sur les effets des différents types de contractions sur la PAP, la contraction isométrique semblait être le seul type de pré-sollicitation ayant eu des effets sur la PAP sur une longue période de temps.

#### ***iv. b) Contraction dynamique***

Même si la littérature semble postuler que les contractions isométriques seraient plus enclines à induire la PAP, quelques études utilisant des tâches de pré-sollicitation dynamiques pluriarticulaires ont enregistré des améliorations de performance (Kilduff et al., 2007; Young et al., 1998). Par contre, d'autres études n'ont démontré aucun effet sur la performance (Esformes et al., 2011; Jones et Lees, 2003).

Baudry et Duchateau (Baudry et Duchateau, 2004) ont, quant à eux, enregistré des résultats similaires indépendamment du type de contraction. Cependant, le type de mesures colligées pourrait avoir biaisé les résultats (Esformes et al., 2011) qui, comparativement à la littérature, tendent à démontrer qu'une contraction isométrique brève et de haute intensité permettrait d'obtenir des gains de performance (se référer aux sections précédentes pour un rappel des détails).

#### ***iv. c) Durée et fréquence de la pré-sollicitation***

Des tâches de pré-sollicitation de courte durée (moins de 10 secondes) induiraient de manière plus importante la PAP (Batista et al., 2011; Miyamoto et al., 2011; Weber et al., 2008; Esformes et al., 2010; Rassier et Macintosh, 2000). Par contre, une pré-sollicitation maximale de 10 secondes supprimerait les bénéfices liés à la PAP (Gossen et Sale, 2000; Hodgson et al., 2005).

Miyamoto et al. ont démontré que la force isocinétique concentrique était augmentée suivant une pré-sollicitation isométrique maximale de 6 secondes (Miyamoto et al., 2011). Les travaux de Miyamoto et al. (Miyamoto et Kanehisa, 2012) ont aussi noté qu'une pré-sollicitation d'une durée de 5 à 6 secondes de nature isométrique ou par

stimulation neuromusculaire engendrerait une amélioration de performance ( $6.6 \pm 2.3\%$  de la valeur initiale (MVC) pour 1 minute après la pré-sollicitation et de  $7.2 \pm 2.6\%$  pour 3 minutes après la pré-sollicitation) lors de tâches dynamiques et que les plus grands effets seraient observés au début de l'exercice. La figure 3 démontre ces améliorations par rapport à une valeur initiale de force maximale volontaire.

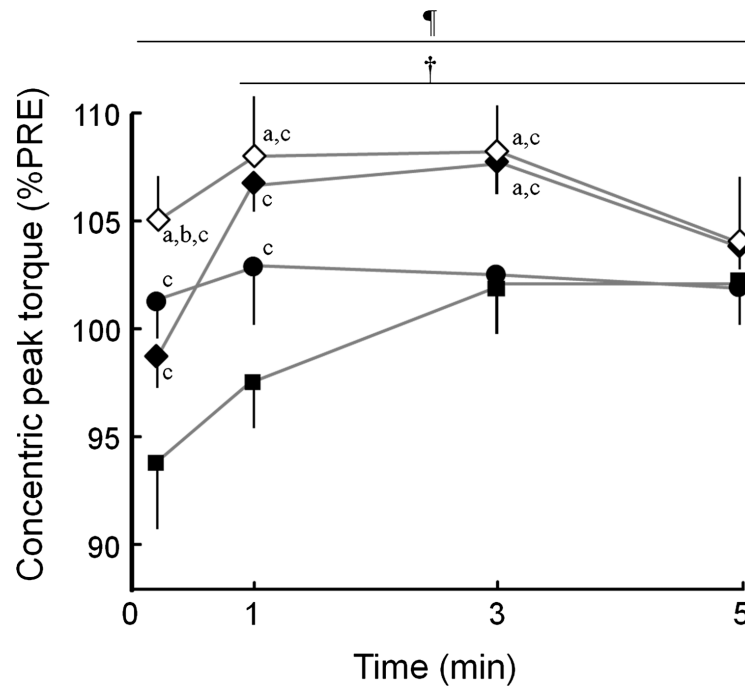


Figure 3. Modifications de la force maximale concentrique après une pré-sollicitation de 3 secondes (cercles noirs), 5 secondes (losanges noirs) et 10 secondes (carrés noirs) par rapport à la force maximale volontaire initiale (MVC), et après 5 secondes (losanges vides) suite à une électrostimulation sous-cutanée à 20 Hz. Les valeurs représentent un pourcentage de la valeur initiale, celle-ci ayant été mesurée avant chaque condition de pré-sollicitation. † Significativement différent ( $p < 0.05$ ) de l'essai de 5 secondes MVC et ¶ 5 secondes avec électrostimulation sous-cutanée. <sup>a</sup> Significativement différent ( $p < 0.05$ ) de l'essai de 3 secondes. <sup>b</sup> Significativement différent ( $p < 0.05$ ) de l'essai de 5 secondes. <sup>c</sup> Significativement différent ( $p < 0.05$ ) de l'essai de 10 secondes. Moyenne  $\pm$  écart-type. (Tirée de (Miyamoto et al., 2012))

La majorité des études rapportant une amélioration de la performance suite à une pré-sollicitation exécutaient des exercices ne comportant qu'une seule série (Robbins et Docherty, 2005). Les travaux de Clark et al. (Clark et al., 2006) démontrent qu'une seule série d'un exercice de pré-sollicitation engendre une amélioration de la performance, mais que les effets seraient d'une plus courte durée (Clark et al., 2006).

Une étude a évalué l'effet d'une pré-sollicitation sur un exercice comportant 3 séries consécutives, mais la performance de ces dernières n'en a pas été augmentée (Robbins et Docherty, 2005). Par contre, il semblerait que plusieurs répétitions maximales d'un exercice de pré-sollicitation (ex: 3 répétitions de 3 secondes lors d'une extension au genou) soient favorables à l'augmentation de la performance comparativement à une condition sans pré-sollicitation (Miyamoto et Kanehisa, 2012; French et al., 2003; Güllich et Schmidtbleicher, 1996). La figure 4 regroupe les études ayant été réalisées avec un protocole unique (une série) et un protocole multiple (plusieurs séries) chez des sujets non-entraînés, entraînés et athlètes. Celle-ci permet de mettre en lumière la différence marquée entre la réalisation d'une seule et de plusieurs séries d'un protocole de pré-sollicitation sur la performance (Wilson et al., 2013).



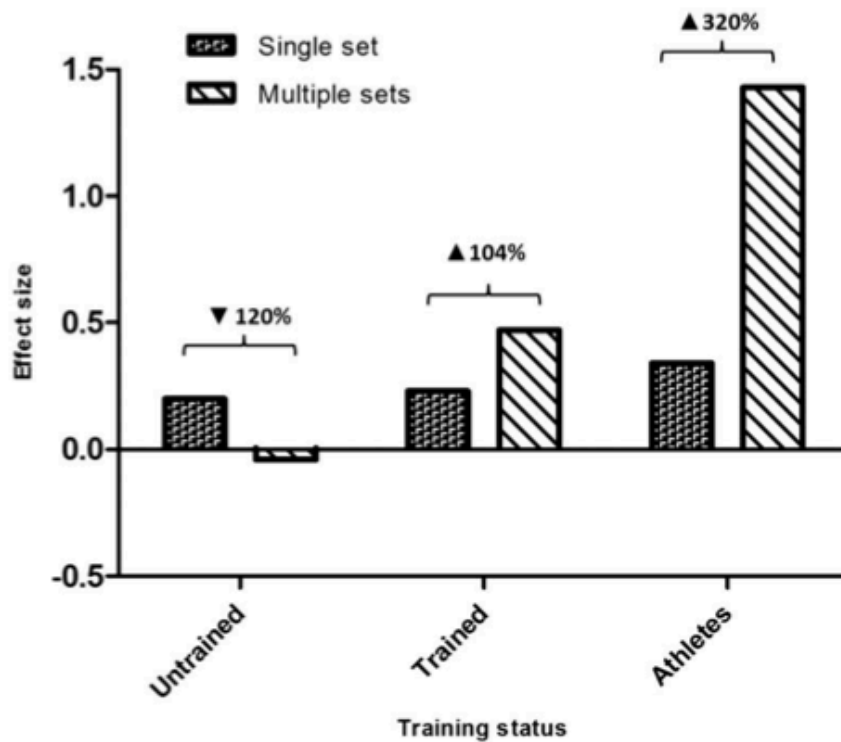


Figure 4. Effets d'un protocole de pré-sollicitation unique (une seule série) et multiple (plusieurs séries) chez des sujets non-entraînés, entraînés et athlètes. À noter que la réalisation de plusieurs séries est au détriment de la performance chez le sujet non-entraîné alors qu'il est préférable au protocole unique chez les sujets entraînés et athlètes. Il est aussi à noter l'important effet chez les athlètes entre un protocole unique et multiple. Figure illustrée en fonction de l'effet de taille. (Tirée de Wilson et al., 2013)

#### ***iv. d) Volume et intensité de la pré-sollicitation***

Plutôt un consensus dans la littérature, la pré-sollicitation de haute intensité induirait de manière plus importante la PAP (Batista et al., 2011; Miyamoto et al., 2011; Esformes et al., 2010; Khamoui et al., 2009b; Weber et al., 2008; Rassier et Macintosh, 2000) par l'augmentation de changements de courts termes de la performance neuromusculaire (Gilbert et Lees, 2005). Elle serait d'autant plus importante lorsqu'une performance dynamique d'intensité maximale serait effectuée suite à la pré-sollicitation (Miyamoto et Kanehisa, 2012), comme des sauts (Weber et al., 2008), tant pour les membres inférieurs que supérieurs (Esformes et al., 2011). De plus, les athlètes répondraient mieux à une tâche de pré-sollicitation avec une forte charge (de 1 à 5 séries de 85% à 90% du 1RM) avant l'exécution d'un exercice explosif (Tillin et Bishop, 2009).

Les travaux de Rahimi et al. (Rahimi, 2007) ont permis d'évaluer un éventail de charges (légère, moyenne et élevée) afin de cerner le stimulus qui engendrait une meilleure réponse de PAP. Ils ont dénoté qu'une charge devait être supérieure à 80% du 1RM pour induire une amélioration de la performance (temps de sprint 40m diminué de 1.9% avec une pré-sollicitation de 60% du 1RM de 1.77% pour 70% du 1RM, et 2.98% pour une charge de 85% du 1RM) à la suite de la PAP. Par contre, l'exercice de pré-sollicitation consistait en un squat (dynamique), ce qui, encore une fois, élargit l'éventail de possibilités pouvant induire la PAP.

Duthie et al. (Duthie et al., 2002) ont aussi observé les effets de la PAP induite par un exercice de haute intensité en exécutant un 3 répétitions maximales d'un exercice de

squat avant un exercice de squats sautés avec charge sur 3 séries consécutives (Robbins et Docherty, 2005).

#### ***iv. e) Temps de récupération***

Certes, la fenêtre temporelle nécessaire à l'induction de la PAP est propre à chaque individu et est fonction des conditions d'exécution de l'exercice de pré-sollicitation (Docherty et Hodgson, 2007). Par contre, certaines études ont permis d'établir des normes selon les exigences du type d'activité subséquente (Kilduff et al., 2007). Tout en tenant compte des différences individuelles chez chaque athlète, une période entre 8 et 12 minutes entre la pré-sollicitation de haute intensité et la tâche explosive (sauts) à réaliser serait la fenêtre optimale pour améliorer la performance (Bevan et al., 2009; Kilduff et al., 2007). Miyamoto et al. (Miyamoto et Kanehisa, 2012) ont déterminé que lors d'une tâche de pré-sollicitation concentrique, l'amélioration de la performance était observée après 1 à 3 minutes de récupération. Gossen et al. (Gossen et Sale, 2000) n'ont d'ailleurs inscrit aucune amélioration à ce même type de tâche lorsqu'un temps de récupération de moins de 1 minute était attribué. Le tableau 1 répertorie les études ayant évalué les temps de récupération suite à un exercice de pré-sollicitation.

Study	Participants	CA	Volume/Intensity	Interval CA between MA	MA	Results Jump Height
Kilduff et al. 2007	23 ATL rugby	Squat	1 x 3 RM	15 s, 4, 8, 12, 16 and 20 min	CMJ	ND
Kilduff et al. 2008	20 ATL rugby	Squat	3 x 3 RM (87% 1RM)	15 s, 4, 8, 12, 16 and 20 min	8 CMJ	↓ (15 s) ↑ (8 min)
Jones & Lees 2003	8 TRA	Squat	1 x 5 rep (85% 1 RM)	3, 10 and 20 min	3 CMJ 3 DJ	ND
Esformes et al. 2010	13 ATL power	Squat	1 x 3 RM	5 min	3 CMJ	ND
Saez Saez de Villarreal et al. 2007	12 ATL volleyball	Squat	2 x 4 rep (80% 1 RM) + 2 x 2 rep (85% 1 RM) 2 x 4 rep (80% 1 RM) + 2 x 2 rep (85% 1 RM) + 2 x 1 rep (90% 1 RM)	5 min and 6 h	CMJ DJ	↑ (5 min, 6 h)
Mitchell & Sale 2011	11 ATL rugby	Squat	1 x 5 RM	4 min	5 CMJ	↑
Crewther et al. 2011	9 ATL	Squat	1 x 3 RM	15 s, 4, 8, 12, and 16 min	CMJ	↑ (4, 8, 12 min) ↓ (15 s, 16 min)
Webber et al. 2008	12 ATL Power	Squat	1 x 5 rep (85% 1 RM)	3 min	7 CMJ	↑
Till & Cooke 2009	20 ATL soccer	Deadlift	1 x 5 RM	7 min	3 CMJ	ND
Khamoui et al. 2009	16 TRA	Squat	1 x 2 - 5 RM (85% 1 RM)	5 min	6 CMJ	ND
Young et al. 1998	10 TRA	Squat	1 x 5 RM	4 min	3 CMJ + 19 Kg	↑
Gourgoulis et al. 2003	20 TRA	Squat	5 x 2 rep (20, 40, 60, 80 and 90% 1 RM)	± 20 min	2 CMJ	↑
Jensen & Ebben 2003	10 ATL Power	Squat	1 x 5 RM	10 s, 1, 2, 3 and 4 min	CMJ	↓ (10 s)
Deutsch & Lloyd 2008	8 TRA	Squat	1 x 3 RM	10 min	CMJ	ND

ATL – athletes; CA – conditioning activity; CMJ – countermovement jump; DJ – drop jump; MA – main activity; ND – no significant difference; rep – repetitions; RM – repetition maximum; s – second; ↑ – significant increment in jump height; ↓ – significant decrement in jump height; TRA – trained.

Tableau 1. Principaux ouvrages traitant des temps de récupération après une tâche de pré-sollicitation et performances de sauts associées. (Tirée de Gouvêa et al., 2013)

D'un autre côté, Kilduff et al. (Kilduff et al., 2008) ont aussi établi que des périodes de moins de 2 à 3 minutes ne seraient pas suffisantes pour induire la PAP dans des activités explosives subséquentes. Appuyant les résultats de Kilduff et al. (Kilduff et al., 2008), Jensen et Ebben (Jensen et Ebben, 2003) ont déterminé qu'une période de récupération d'au moins 4 minutes avant l'exécution d'une tâche permettrait une amélioration de la performance, soutenant aussi les travaux de Hodgson et al. (Hodgson et al., 2005). De plus, leurs travaux stipulent que des tâches de sauts ne devraient pas être réalisées toute de suite après l'exercice de pré-sollicitation, sans quoi une diminution de la performance peut être enregistrée. Les travaux de Smith et al. (Smith, et al., 2001) et de Derenne (Derenne, 2010) ont trouvé qu'un repos de 5 minutes permettait d'enregistrer une amélioration de la performance. La figure 5 illustre la puissance mécanique atteinte lors d'un exercice d'extension du genou à plusieurs temps (minutes) après une pré-sollicitation.

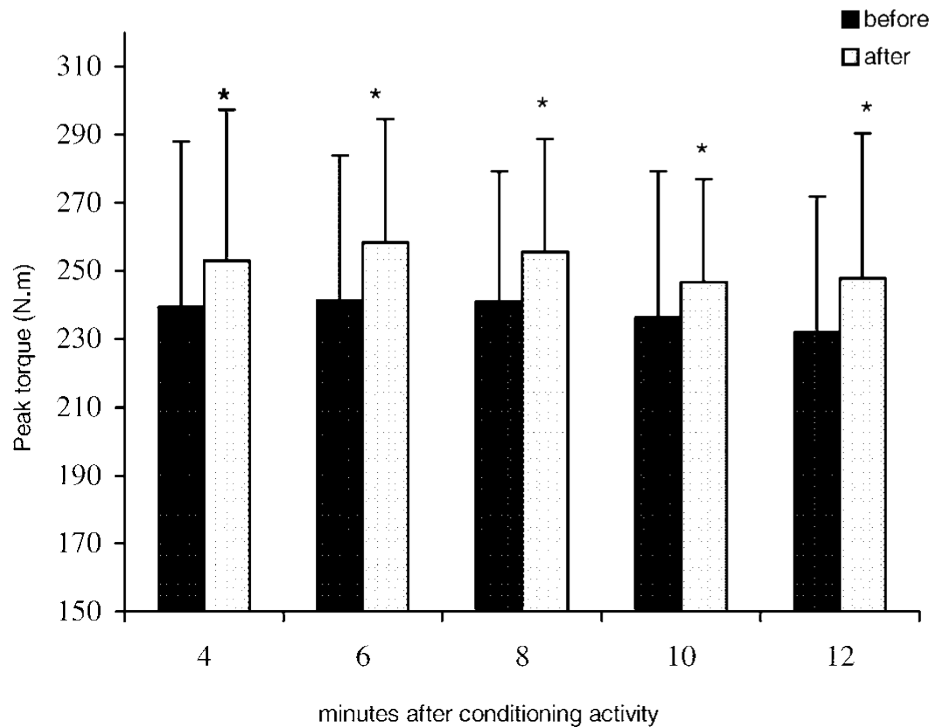


Figure 5. Puissance mécanique lors d'une extension du genou avant (before) (représentée par les valeurs de la première contraction de l'activité de pré-sollicitation (conditioning activity; CA) et après (after) l'activité de pré-sollicitation (4, 6, 8, 10, et 12 minutes après CA). L'activité de pré-sollicitation consistait en 10 contractions maximales isocinétiques entrecoupés de 30 secondes repos. \* Indique une différence significative entre avant et après ( $p < 0.05$ ). (Tirée de (Batista et al., 2007))

En comparant les effets de taille des études catégorisées selon le nombre de minutes de repos attribuées après une tâche de présollicitation, les figures 6, 7, 8 et 9 permettent d'affirmer que des temps de repos trop courts (entre 0 et 3min) seraient au détriment de la performance, alors qu'une période de récupération entre 8 à 12min engendrerait des effets bénéfiques sur la performance (Gouvêa et al., 2013).

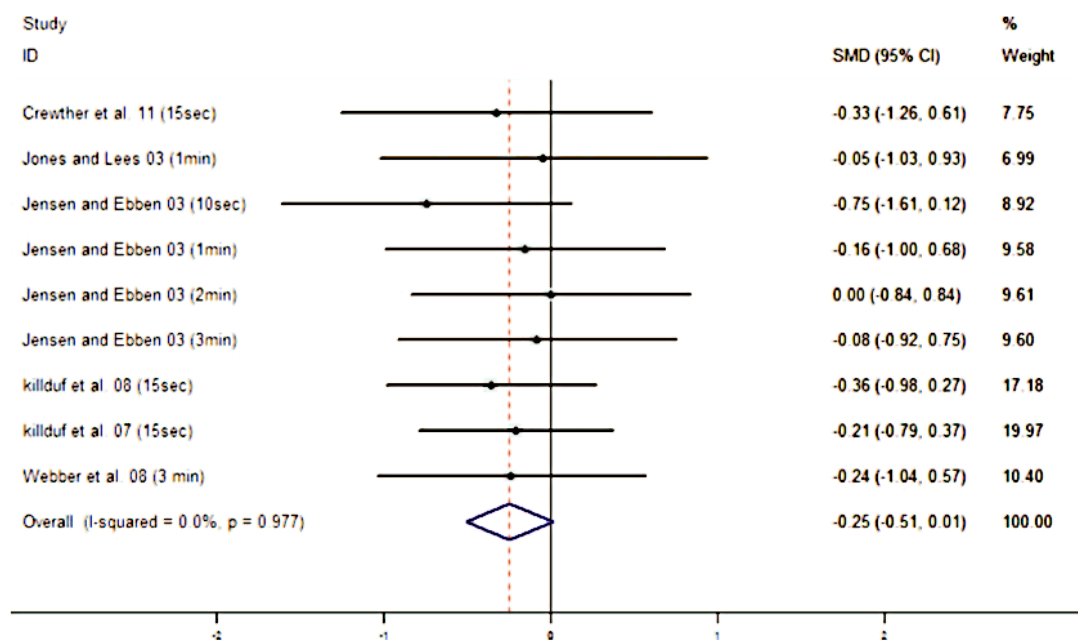


Figure 6. Effets de la pré-sollicitation sur la performance après un temps de récupération entre 0 et 3 minutes. SMD = différence moyenne standardisée (standardized mean difference). (Tirée de Gouvêa et al., 2013)

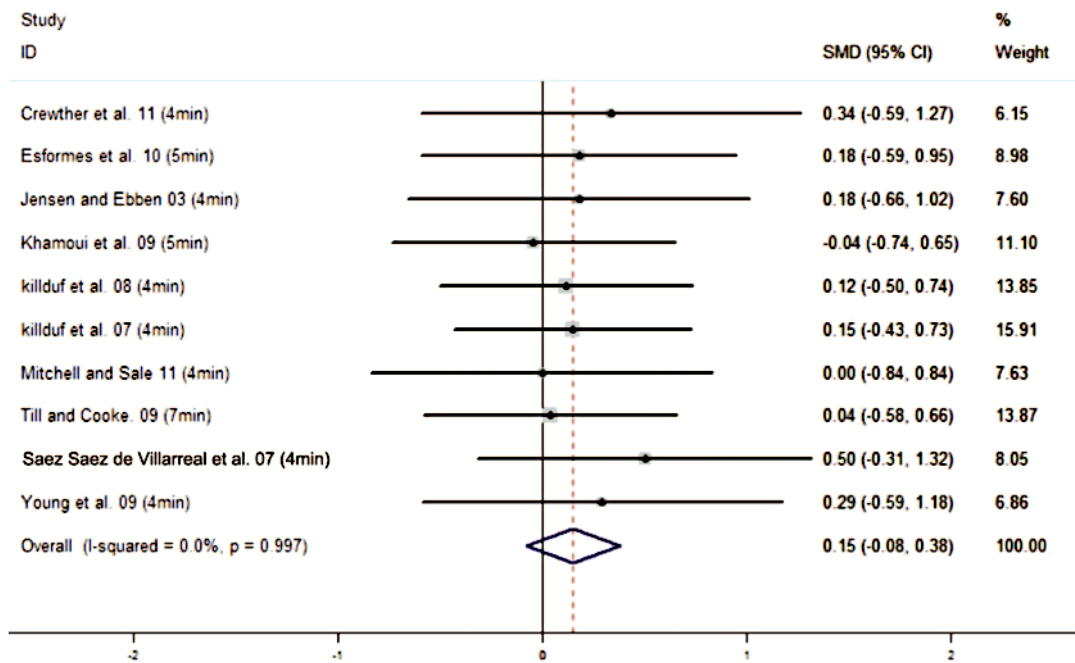


Figure 7. Effets de la pré-sollicitation sur la performance après un temps de récupération entre 4 et 7 minutes. SMD = différence moyenne standardisée (standardized mean difference). (Tirée de Gouvêa et al., 2013)



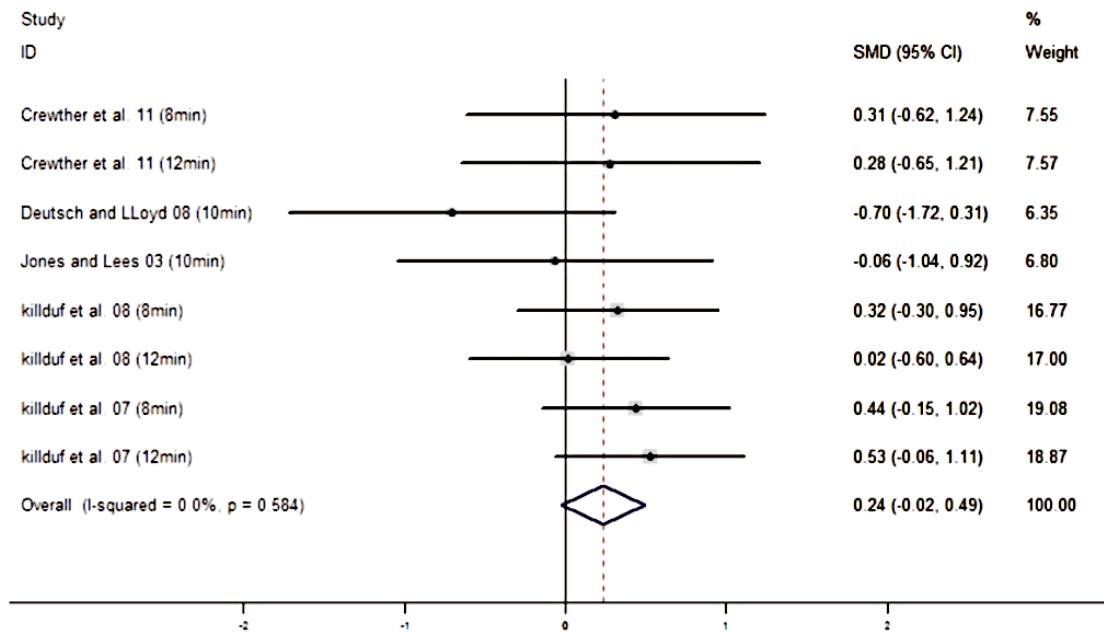


Figure 8. Effets de la pré-sollicitation sur la performance après un temps de récupération entre 8 et 12 minutes. SMD = différence moyenne standardisée (standardized mean difference) (Tirée de Gouvêa et al., 2013)

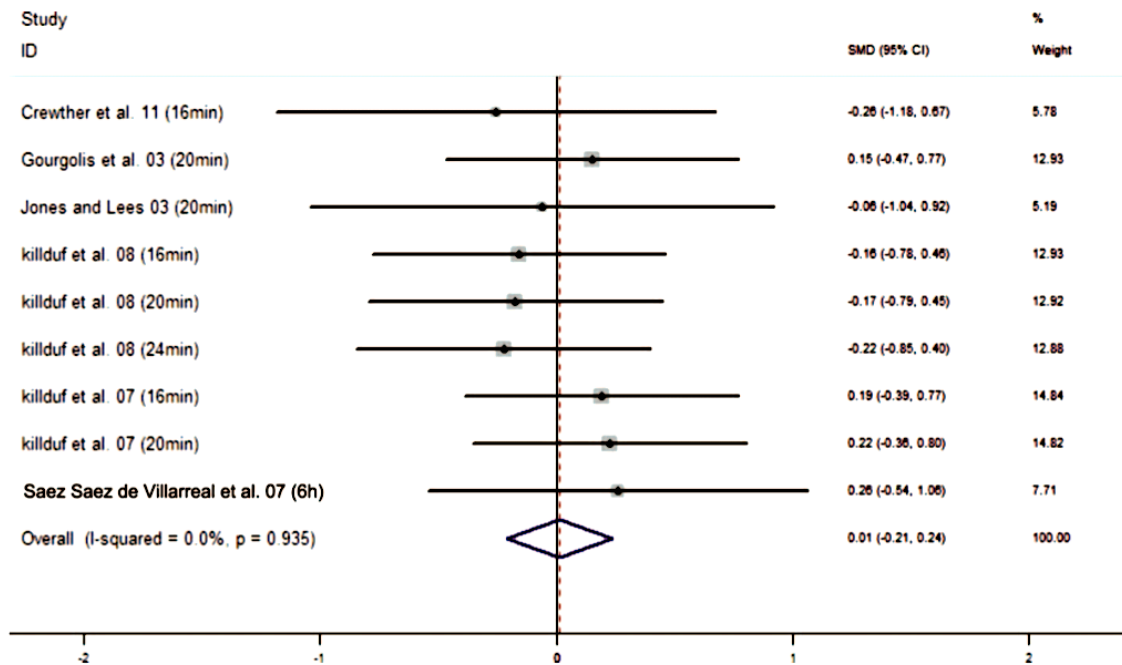


Figure 9. Effets de la pré-sollicitation sur la performance après un temps de récupération de 16 minutes et plus. SMD = différence moyenne standardisée (standardized mean difference) (Tirée de Gouvêa et al., 2013)

Somme toute, les différents ouvrages mentionnés précédemment permettent de croire qu'une période de repos entre 4 et 12 minutes permettrait d'obtenir une augmentation de la performance suite à un exercice de pré-sollicitation. Il est aussi à noter que le temps de récupération afin de bénéficier des effets de la PAP sont dépendants du niveau d'entraînement, comme le montre la figure 10, qui a répertorié les études comparant les différents groupes selon le niveau d'entraînement (Wilson et al., 2013).

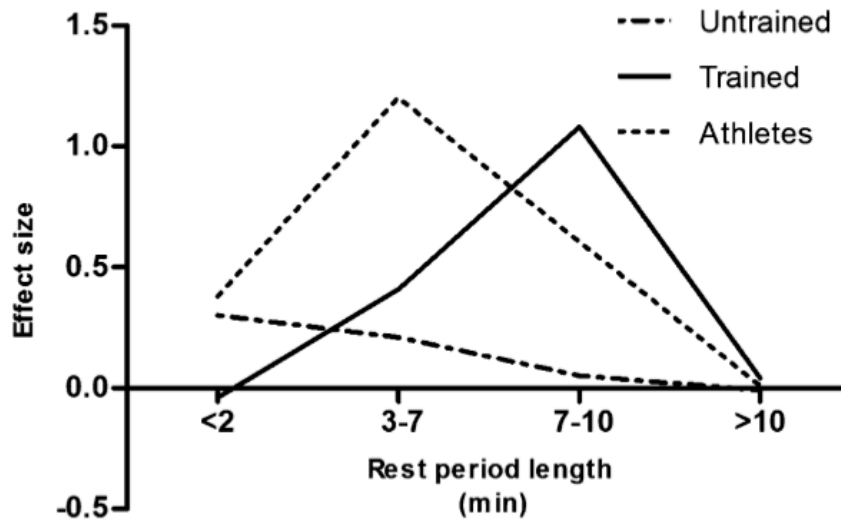


Figure 10. Temps de récupération selon le niveau d'entraînement dans l'observation des effets induits par la PAP. Chez les sujets athlètes, il semblerait que la période charnière afin d'obtenir un gain de la performance serait plus courte (entre 3 et 7 minutes) que chez les sujets entraînés (entre 7 et 10 minutes), tandis que chez les sujets non-entraînés, cette période serait plus réduite et serait d'amplitude moindre (moins de 2 minutes). (Tirée de Wilson et al., 2013)

Somme toute, la nature de la tâche de performance à réaliser de même que celle de la pré-sollicitation pourraient jouer sur le temps nécessaire afin d'induire la PAP.

## **v. Différence selon le niveau d'entraînement et la typologie musculaire**

Il semblerait y avoir une corrélation entre le pourcentage de fibres de type II et le potentiel de PAP (Ding et al., 2003; Sale, 2002; Abbate et al., 2000; Hamada et al., 2000; Moore et Stull, 1984). En effet, il y aurait une corrélation positive entre le pourcentage de fibres rapides de type II, l'activité des motoneurones et la phosphorylation des RLC (plus grande phosphorylation des RLC en réponse à une activité de pré-sollicitation) (Tillin et Bishop, 2009), induisant une meilleure PAP (Hodgson et al., 2005; Sweeney et al., 1993). L'amplitude de la PAP serait dépendante de l'intensité et de la durée de l'effort, du type de fibre musculaire (Hamada et al., 2000; Hodgson et al., 2005) et spécifique à l'expérience d'entraînement (Duthie et al., 2002; Rixon et al., 2007).

Il est reconnu que chez les athlètes de haut niveau dans les disciplines explosives et de courte durée, la proportion de fibres rapides (IIa, IIb) serait plus importante (Tesch et Karlsson, 1985; Costill et al., 1976). Il s'agirait d'une des raisons pour lesquelles les athlètes dans ces disciplines seraient plus enclins à induire une PAP (Güllich et Schmidtbleicher, 1996) que des sujets non-entraînés (Khamoui, 2008; McBride et al., 2005; Gilbert et Lees, 2005; Chiu et al., 2003; Izquierdo et al., 2002).

## **iv. Évidences quant à l'amélioration de la performance chez le sujet entraîné**

Les effets de la PAP seraient dépendants de l'expérience d'entraînement et de la force musculaire (Batista et al., 2011). En outre, il a été démontré que les athlètes de puissance produisent une plus grande force maximale que les athlètes d'endurance.

Cette différence serait liée au niveau de régulation de l'activation agoniste et la coactivation antagoniste et/ou aux adaptations périphériques, telles que l'aire transversale, la proportion de fibres musculaires de type I ou II et les propriétés contractiles (Garrandes et al., 2007).

Bien que les évidences soient marquées chez les athlètes à disciplines explosives, il serait plus facile d'observer les effets de la PAP chez les athlètes d'endurance par rapport à des sujets non-entraînés. Ceci serait expliqué en partie par une meilleure vitesse de contraction des fibres musculaires de type I, qui seraient majoritairement mieux développées chez ce type d'athlète, ainsi que par une meilleure résistance à la fatigue. De cette manière, une plus grande fenêtre d'opportunité pour les effets de la PAP serait observée, prévalant ainsi à ceux de la fatigue étant donné la capacité supérieure de résister à la fatigue (Feros et al., 2012). La figure 11 illustre la différence de la réponse à une pré-sollicitation chez des sujets féminins entraînés en puissance, en endurance, et non-entraînés. Elle démontre que les athlètes en puissance sont capables de générer un taux de développement de la force plus élevé par rapport à une valeur initiale maximale suite à une tâche de pré-sollicitation que des sujets entraînés en endurance ou non-entraînés.

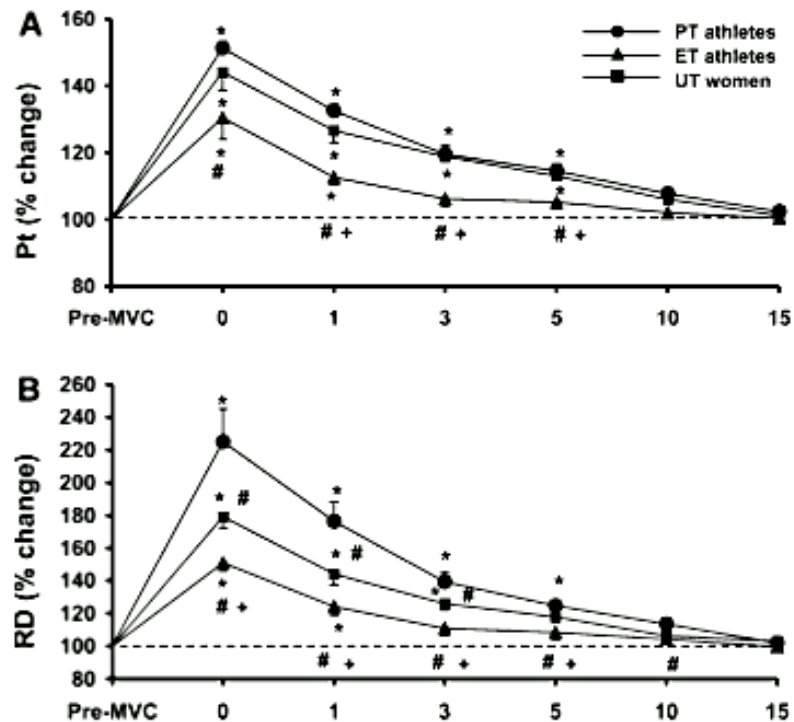


Figure 11. Différence de la réponse à une pré-sollicitation chez des athlètes en puissance, endurance et des sujets non-entraînés. Modifications du pic de puissance (Pt) (A), du pic de taux de développement de puissance (B) des extenseurs du genou lors d'une contraction isométrique chez des athlètes féminines en puissance (PT, n=12), d'endurance (ET, n = 12) et sujets non-entraînés (UT, n = 12) après une pré-sollicitation maximale de 10 secondes. Les valeurs sont exprimées en pourcentages de la valeur maximale initiale (trait pointillé) (moyenne  $\pm$  écart-type). \* Significativement différent des valeurs initiales ( $p < 0.05$ ); # significativement différent comparé aux athlètes PT ( $P < 0.05$ ); + significativement différent par rapport aux femmes UT ( $p < 0.05$ ) (Pääsuke et al., 2007).

La PAP peut être utilisée lors de performances et en entraînement. En effet, en plus de ses manifestations lors de performances isométriques et dynamiques (contractions concentriques et/ou excentriques), la PAP peut être conditionnée lors d'une méthode d'entraînement dite "complexe". Celle-ci implique deux exercices subséquents différents, dont un exercice étant caractérisé par une contraction excentrique suivie immédiatement d'une contraction concentrique. Cette modalité d'entraînement est appelée *pliométrie*. Ainsi, l'entraînement complexe se définit comme étant un exercice de grande charge externe (considérée comme une pré-sollicitation) suivi d'un exercice de nature pliométrique biomécaniquement comparable (sans charge externe, ex: saut) dans un même entraînement. Cette méthode d'entraînement a pour but d'augmenter la puissance mécanique de cet exercice (Bevan et al., 2009). Cette méthode a été démontrée comme étant efficace pour l'augmentation de la puissance mécanique chez l'athlète (Bevan et al., 2009). En effet, des études montrent que l'amélioration de la performance à une tâche explosive est davantage marquée chez les athlètes ayant exécuté des exercices de pré-sollicitation de grande charge (ex.: 5 séries à 90% du 1RM) (Batista et al., 2011; Esformes et al., 2011; Derenne, 2010).

## **vi. Rôles et applications dans la performance sportive**

La potentialisation post-activation et ses implications dans l'amélioration des performances sont reconnues dans les tâches explosives, telles que le sprint (Bevan et al., 2010), les lancers (Markovic et al., 2008), les départs de natation (Kilduff et al., 2011) et les activités de levées de charge (Crewther et al., 2011; Rixon et al., 2007). En effet, il existe une relation positive entre la PAP et la production de force lors d'un exercice subséquent (Chiu et al., 2003; Rixon et al., 2007; Sale, 2002). Parmi les études



sur la PAP et les tâches de sauts, la grande majorité ont enregistré des améliorations de performances (Witmer et al., 2010). La PAP, induisant une augmentation de la force et/ou de la vitesse de contraction du muscle, du taux de développement de la force et de l'accélération, augmenterait effectivement le pic de vitesse et la puissance atteinte pendant une performance dynamique (Gossen et Sale, 2000; Hodgson et al., 2005; Tillin et Bishop, 2009). L'état plus sensible et excitable du système neuromusculaire associé à la PAP décrit ci-dessus suite à une activité de pré-sollicitation augmenterait par conséquent les performances explosives subséquentes (Robbins et Docherty, 2005). En effet, distinctement dans ce type de tâche, la PAP a été recensée comme ayant un effet significatif sur la performance subséquente (Kilduff et al., 2011; Khamoui et al., 2009b; Babault et al., 2008; Güllich et Schmidtbleicher, 1996). L'effet potentialisateur ne serait cependant pas relié à la modalité de contraction de pré-sollicitation (stimulation ou contraction volontaire) précédemment à une tâche dynamique (Baudry et Duchateau, 2007). La figure 12 illustre l'augmentation de performance à un saut en contrebas (CMJ) suite à un exercice de pré-sollicitation de squat.

Pour compléter les éléments mentionnés précédemment, les athlètes de haut niveau sont plus enclins à produire un effet de PAP puisqu'ils ont, entre autres, développé une résistance à la fatigue de par leurs adaptations à l'entraînement (Tillin et Bishop, 2009; Rixon et al., 2007). De plus, les sujets ayant une plus grande force maximale amélioreraient davantage leur performance de saut vertical que des sujets ayant une capacité plus faible (4.01% chez les sujets entraînés vs 0.42% chez les sujets non-entraînés) (Gourgoulis et al., 2003; Young et al., 1998). D'un autre côté, il ne semblerait

pas y avoir de différence entre les hommes et les femmes quant à la manifestation de la PAP (Witmer et al., 2010).

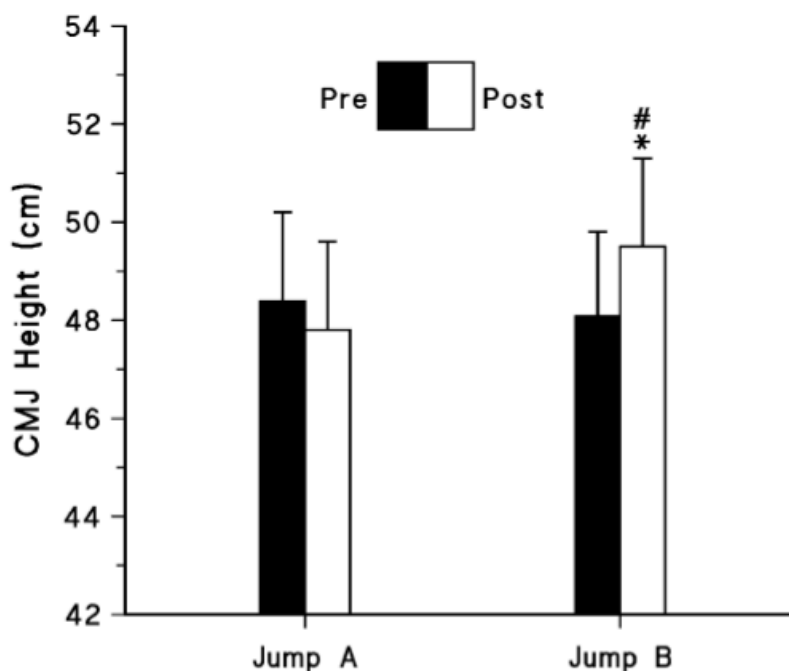


Figure 12. Hauteur (cm) du saut en contrebas (CMJ) atteinte suite à un protocole sans et avec pré-sollicitation. *Pre* réfère à une première série de 5 CMJ initiaux. *Post* réfère à la performance de sauts finale (2ème) après un repos de 8min (Jump A) ou 4min après un squat de 5RM 4min avant la tâche de CMJ finale (B). \* Différence significative entre *Pre* et *Post* ( $p < 0.05$ ). # Différence significative avec Jump A Post. ( $p < 0.05$ ). (Tirée de Mitchell et Sale, 2011)

Une étude récente démontre même qu'un protocole de pré-sollicitation des membres supérieurs améliorerait la performance subséquente lorsque comparée à l'échauffement seul. En effet, Feros et al. (Feros et al., 2012) ont noté une diminution de 0.8% ( $p < 0.05$ ) du temps sur une performance de 1000 mètres sur ergomètre à ramer et une diminution de 1.9% sur une tâche de 500 mètres. Il devient donc intéressant de considérer cette approche dans une optique de préparation physique de l'athlète à une performance sans toutefois créer une trop grande quantité de fatigue.

Afin d'avoir un aperçu général des travaux sur la PAP, les tableaux 2 et 3 regroupent les principaux articles ayant été réalisés et relatent des principales modalités appliquées et des effets observés (Tillin et Bishop, 2009).

Study	Subjects	Pre-conditioning contraction (condition)	Volume	Rest interval	Performance test	Performance changes
Batista et al. <sup>[47]</sup>	10 UT M	Isovelocity MVC, knee extension	10 (30 sec RI)	4 min 6 min 8 min 10 min	Isovelocity knee extensions at all rest intervals	6% ↑ P <sub>t</sub> * at each rest interval
Behm et al. <sup>[34]</sup>	9 UT M	Isometric MVC, knee extension	1 × 10 sec 2 × 10 sec (1 min RI) 3 × 10 sec (1 min RI)	1, 5, 10, 15 min for all volumes	Isometric MVC knee extensions at all rest intervals	↔ ↔ 10-min post: 8.9% ↓ P <sub>t</sub> * 15-min post: 7.5% ↓ P <sub>t</sub> *
Chatzopoulos et al. <sup>[48]</sup>	15 UT M	Back-squat	10 × 1 rep 90% 1 RM (3 min RI)	3 min 5 min	30-m sprint 30-m sprint	↔ 3% ↓ 0-10-m sprint time*, 2% ↓ 0-30-m sprint time*
Chiu et al. <sup>[20]</sup>	24; 7 RT, 17 UT (12 M, 12 F)	Back-squat	90% 1 RM × 5 (2 min RI)	5 min 6 min 7 min 5 min 6 min 7 min	CMJ: 30% 1 RM 50% 1 RM 70% 1 RM SJ: 30% 1 RM 50% 1 RM 70% 1 RM	RT: 1-3% ↑, UT: 1-4% ↓. RT > UT* RT: 1-3% ↑, UT: 1-4% ↓. RT > UT* RT: 1-3% ↑, UT: 1-4% ↓. RT = UT RT: 1-3% ↑, UT: 1-4% ↓. RT > UT* RT: 1-3% ↑, UT: 1-4% ↓. RT = UT RT: 1-3% ↑, UT: 1-4% ↓. RT = UT
Ebben et al. <sup>[49]</sup>	10 RT M	Dynamic bench-press	3-5 RM	0-5 sec	Medicine ball BPT	↔ GRF
French et al. <sup>[50]</sup>	14 RT (10 M, 4 F)	Isometric MVC, knee extension	3 sec × 3 (3 min RI) 5 sec × 3 (3 min RI)	0-5 sec	CMJ DJ 5 sec C-sprint Isovelocity KE CMJ DJ 5 sec C-sprint isovelocity KE	↔ ↔ 5.0% ↑* (4.9% ↑ GRF*) ↔ 6.1% ↑ P <sub>t</sub> * ↔ ↔ ↔ 3.0% ↓ P <sub>t</sub> *
Gilbert et al. <sup>[51]</sup>	7 RT M	Back-squat	100% 1 RM × 5 (5 min RI)	2 min 10 min 15 min 20 min 30 min	Isometric MVC at all rest intervals	5.8% ↓ RFD 5.8% ↓ RFD 10.0% ↑ RFD 13.0% ↑ RFD* ↔
Gossen and Sale <sup>[11]</sup>	10 UT (6 M, 4 F)	Isometric MVC, knee extension	10 sec	20 sec 40 sec	Dynamic KE Dynamic KE	↔ ↔

Continued next page

Tableau 2. Sommaire des études ayant évalué les effets de la pré-sollicitation sur une tâche subséquente. (Tirée de Tillin et Bishop, 2009)

Study	Subjects	Pre-conditioning contraction (condition)	Volume	Rest interval	Performance test	Performance changes
Gourgoulis et al. <sup>[15]</sup>	20 M (11 RT, 9 UT)	Back-squats	2 reps of: 20%, 40%, 60%, 80%, and 90% 1RM (5 min RI)	0-5 sec	CMJ	2.4% ↑ RT + UT* RT: 4.0% ↑ UT: 0.4% ↑
Gulich and Schmidbleicher <sup>[10]</sup>	Study 1: 34 RT (22 M, 12 F) Study 2: 8 RT	Isometric MVC, leg press Isometric MVC, plantarflexion	3 × 5 sec (5 min RI) 5 × 5 (1 min RI)	3 min, then every 20 sec. 8 jumps measured 1 min, then every 2nd min for 13 min	CMJ and DJ Isometric MVC, plantarflexion	3.3% ↑ CMJ*, ↑ DJ* 13% ↓ RFD 1 min post*, RFD 3 min post. 19% ↑ RFD 5-13 min post*
Hanson et al. <sup>[52]</sup>	30 UT (24 M, 6 F)	Back-squats	4 reps of 80% 1RM	5 min	CMJ	↔
Jenson and Ebben <sup>[53]</sup>	21 RT (11 M, 10 F)	Back-squats	5 RM	10 sec 1 min 2 min 3 min 4 min	CMJ CMJ CMJ CMJ CMJ	4-13% ↓* ↔ ↔ ↔ ↔
Kilduff et al. <sup>[54]</sup>	23 RT M	Dynamic back-squats Dynamic bench-press	1 × 3RM 1 × 3 RM	15 sec 4 min 8 min 12 min 16 min 20 min 15 sec 4 min 8 min 12 min 16 min 20 min	CMJ CMJ CMJ CMJ CMJ CMJ Barbell BPT Barbell BPT Barbell BPT Barbell BPT Barbell BPT Barbell BPT	2.9% ↓ P <sub>p</sub> * ↔ 6.8% ↑ P <sub>p</sub> * 8.0% ↑ P <sub>p</sub> * ↔ ↔ 4.7% ↓ P <sub>p</sub> * ↔ 2.8% ↑ P <sub>p</sub> * 5.3% ↑ P <sub>p</sub> * 0.8% ↑ P <sub>p</sub> *
Magnus et al. <sup>[55]</sup>	10 UT M	Back-squats	90% 1 RM	3 min	CMJ	↔
Rahimi <sup>[45]</sup>	12 RT M	Back-squats	2 × 4 reps of 80% 1 RM (2 min RI)	4 min	40-m sprint	3% ↓ 0-40 m sprint time*
Rixon et al. <sup>[56]</sup>	30 UT (15 M, 15 F)	Dynamic back-squats Isometric MVC back-squats	3 RM 3 × 3 sec (2 min RI)	3 min 3 min	CMJ CMJ	2.9% ↑ JH*, 8.7% ↑ P <sub>p</sub> * ↔ JH, 8.0% ↑ P <sub>p</sub> *
Robbins and Docherty <sup>[57]</sup>	16 UT M	Isometric MVC back-squats	3 × 7 sec (8 min between each set)	4 min	CMJ after each set of isometric MVC	↔
Young et al. <sup>[58]</sup>	10 UT M	Back-squats	5 RM	4 min	LCMJ	2.8% ↑ *

**BPT** = bench press throw; **CMJ** = counter movement jump; **C-sprint** = cycle sprint; **DJ** = drop jump; **F** = females; **GRF** = ground reaction force; **JH** = jump height; **KE** = knee extensions; **LCMJ** = loaded counter movement jump; **M** = males; **MVC** = maximum voluntary contractions; **P<sub>t</sub>** = peak torque; **P<sub>p</sub>** = peak power; **P<sub>f</sub>** = peak force; **RFD** = rate of force development; **RI** = rest interval; **RM** = repetition maximum; **RT** = resistance/athletically trained; **SJ** = squat jump; **UT** = un/recreationally trained; ↑ indicates increase; ↓ indicates decrease; ↔ indicates no differences; \* p < 0.05.

Tableau 3. Sommaire (suite) des études ayant évalué les effets de la pré-sollicitation sur une tâche subséquente. (Tirée de Tillin et Bishop, 2009)

## **C) Coordination musculaire: rôle de la PAP dans la prévention des blessures et dans l'amélioration des performances**

En plus des impacts connus sur la performance suite à une pré-sollicitation, les mécanismes issus de la PAP ont été montrés comme utiles dans la prévention de blessures, notamment des lombalgies du bas du dos (Barton et al., 2013; Cambridge et al., 2012; Carregaro et al., 2011; Gabriel et al., 2006). En effet, les modifications dans la coordination résultant d'une meilleure synchronisation du recrutement (coactivation ou co-contraction) des muscles agonistes et antagonistes (Kellis et Kouvelioti, 2009) auraient un impact positif sur la stabilité articulaire (Baratta et al., 1988; Kellis, 1998; Moorhouse et Granata, 2007; Van Dieën et al., 2011). Par exemple, lors d'exercices à chaînes fermées (ex: squat, fente avant, etc.), la coactivation des quadriceps et des ischio-jambiers représenterait un mécanisme dynamique de protection de l'articulation du genou avec l'apparition de la fatigue (Draganich et al., 1989; Pincivero et al., 2000).

### **i. Étude de la coordination musculaire dans la prévention des blessures**

L'étude de la co-contraction permet d'évaluer les stratégies de recrutement musculaire, et par conséquent, faire état de la coordination inter-musculaire, tant au niveau de l'amélioration des performances que dans la stabilisation articulaire (Baratta et al., 1988). La coordination inter-musculaire résulte des dynamiques d'activation et de désactivation des muscles agonistes et antagonistes, qui constituent le délai entre le développement de la force et la phase de relaxation du muscle (Billaut et al., 2005). Un meilleur équilibre entre l'activation des muscles agoniste et antagoniste en fonction de la tâche à réaliser relate d'une meilleure coordination inter-musculaire (Jaric, 2000). Tel que décrit précédemment, l'amélioration de la coordination induit une meilleure

stabilisation et par conséquent, une protection articulaire. L'amélioration de la coordination donne aussi lieu à un meilleur rendement mécanique (efficacité) et par conséquent, une quantité de travail supérieure.

## **ii. La stabilité à la hanche dans la prévention des blessures**

Les dysfonctions reliées au complexe de la hanche sont associées aux troubles du bas du dos et du genou (Reiman et al., 2012; Dwyer et al., 2010; Powers, 2010; Schoenfeld, 2010; Boudreau et al., 2009; Kibler et al., 2006). En effet, le complexe des muscles fessiers aurait un impact direct sur la stabilité à la hanche (Reiman et al., 2012; Izquierdo et al., 2002) de même que sur les mouvements explosifs des membres inférieurs (Barton et al., 2013; Crow et al., 2012; Reiman et al., 2012). La puissance étant l'un des principaux déterminants de la performance du geste sportif (Crow et al., 2012), il devient d'autant plus intéressant d'inclure ce type d'intervention aux protocoles d'entraînement ou de pré-compétition dans le but d'optimiser les performances de l'athlète tout en diminuant ses risques de blessures.

Par conséquent, les protocoles impliquant une pré-sollicitation et étudiant la co-contraction devraient susciter l'intérêt des chercheurs. En effet, malgré le fait que la diminution de la co-contraction des muscles antagonistes soit associée à une augmentation de la force du muscle agoniste, l'action antagoniste reste nécessaire au contrôle articulaire et à la santé articulaire à long terme (Baratta et al., 1988; Gabriel et al., 2006; Kubo et al., 2007). La co-contraction doit être en équilibre entre les besoins de générer de la force et de stabiliser l'articulation dans le but de prévenir les blessures.

Une seule étude a regardé les effets d'une pré-sollicitation sur le complexe musculaire de la hanche lors d'une tâche explosive. Buttifant et al. (Buttifant, et al., 2011) on évalué 22 athlètes australiens de la ligue professionnelle de football (Australian Football League). Ces derniers ont effectué un protocole de pré-sollicitation d'une durée de 7 minutes comportant divers exercices sollicitant les muscles stabilisateurs à la hanche de manière isolée en comparaison avec un protocole de vibration du corps entier (WBV). Le protocole de vibration sur plateforme, à une fréquence de 30 Hz, était d'une durée de 45 secondes et était réalisé avant l'exécution de 5 répétitions d'un exercice de sauts en contrebas. Le pic de puissance musculaire était ensuite enregistré sur un appareil d'entraînement à barre guidée. Alors que le protocole WBV n'a démontré aucune amélioration de la puissance, le protocole de pré-sollicitation des muscles stabilisateurs à la hanche a enregistré une augmentation de la puissance par rapport à la condition contrôle ( $p < 0.03$ ) et par rapport à la condition WBV ( $p < 0.01$ ). Cependant, le protocole de pré-sollicitation impliquait des contractions sous-maximales et était réalisé sur une longue période de temps. Considérant que les réponses physiologiques et la fatigue neuromusculaire seraient spécifiques à la tâche réalisée (Hunter, 2009), le gain en puissance enregistré pourrait être expliqué en partie par l'amélioration de la coordination inter-musculaire.

À la lumière de ces résultats, il paraît donc intéressant d'étudier le phénomène au niveau des muscles stabilisateurs de la hanche suite à une pré-sollicitation à plus haute intensité et de plus courte durée afin d'être plus spécifique aux exigences sur le terrain. De plus, sachant que l'amélioration de la coordination intermusculaire aurait des effets bénéfiques au niveau de l'augmentation de la puissance de travail et de la stabilité



articulaire, il devient d'autant plus avantageux d'étudier les différentes manifestations neurophysiologiques résultant d'une pré-sollicitation dans le domaine du sport du haut niveau.

#### **D) Le squat comme exercice de pré-sollicitation du bas du corps**

Le squat est l'un des exercices les plus répandus dans le domaine du conditionnement et de la préparation physique pour ses exigences biomécaniques et neuromusculaires similaires aux mouvements sportifs (Schoenfeld, 2010). Le squat permet de solliciter à différentes phases du mouvement la majorité des muscles des membres inférieurs (extenseurs et fléchisseurs du genou et de la hanche, les adducteurs et abducteurs de la hanche, et les gastrocnémiens) (Schoenfeld, 2010). En plus de solliciter plus de 200 muscles pendant l'exécution du squat, le squat isométrique permet de solliciter des muscles accessoires, comme les abdominaux, érecteurs du rachis, trapèzes et rhomboïdes, jouant un rôle dans le maintien de la posture et la stabilisation du tronc (Schoenfeld, 2010).

L'effet potentialisateur serait spécifique aux muscles impliqués lors de la pré-sollicitation (Jo, Judelson, Brown, Coburn, et Dabbs, 2010; Sale, 2002). De ce fait, la PAP est un phénomène qui est observé tant au niveau des membres supérieurs qu'inférieurs, bien que la majorité des études portent sur la portion inférieure du corps (Bevan et al., 2009). La figure 13 démontre l'effet d'une pré-sollicitation sur les membres supérieurs et inférieurs à différents moments. À noter que tout de suite après l'exercice de pré-sollicitation, la performance est diminuée par rapport au niveau initial, en raison de la présence d'un niveau de fatigue important.

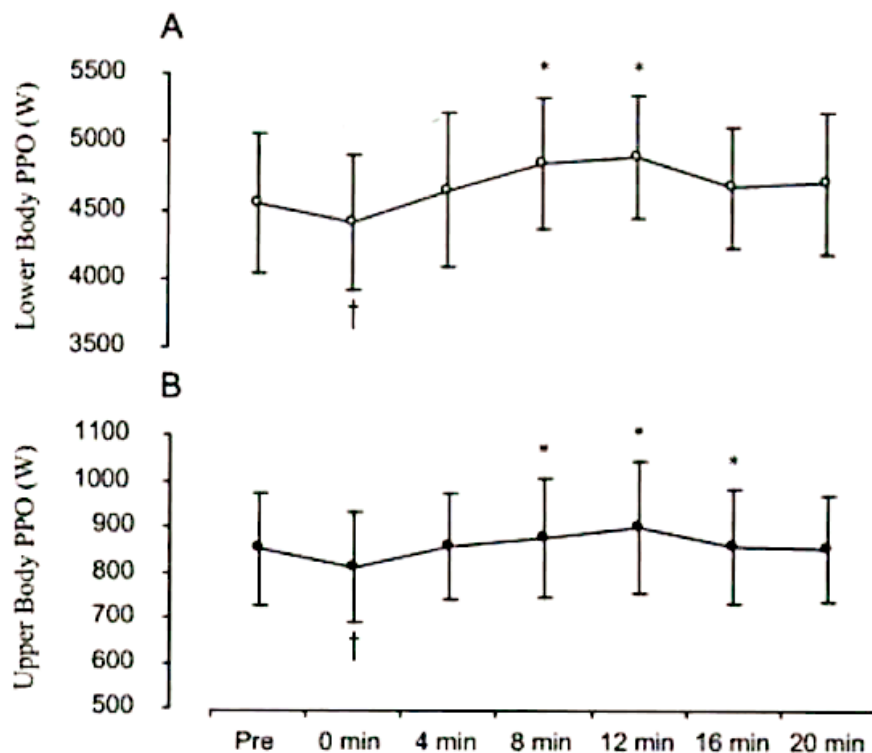


Figure 13. Puissance mécanique à différents moments (min) après une pré-sollicitation des membres inférieurs (A) et supérieurs (B). (Tirée de (Kilduff et al., 2007))

Selon les travaux de Boudreau et al. (Boudreau et al., 2009), l'exécution d'exercices sollicitant les muscles du complexe de la hanche, tels que le squat unilatéral, la fente avant et la montée de marche, augmentent l'activation de muscles impliqués dans le contrôle neuromusculaire de la hanche (droit de la cuisse, grand et moyen fessiers et long adducteur). En activant les muscles stabilisateurs à la hanche en plus des muscles moteurs, le contrôle neuromusculaire est augmenté et par conséquent la stabilité,

pouvant ainsi limiter le risque de blessure, tel que discuté précédemment. Tel qu'illustré à la figure 14, le muscle grand fessier est très impliqué dans les exercices à chaînes fermées et le squat unilatéral figure parmi les 3 exercices sollicitant le plus le grand fessier lors d'une contraction isométrique maximale. Son implication dans l'extension à la hanche souligne donc son importance dans la réalisation de tâche explosive.

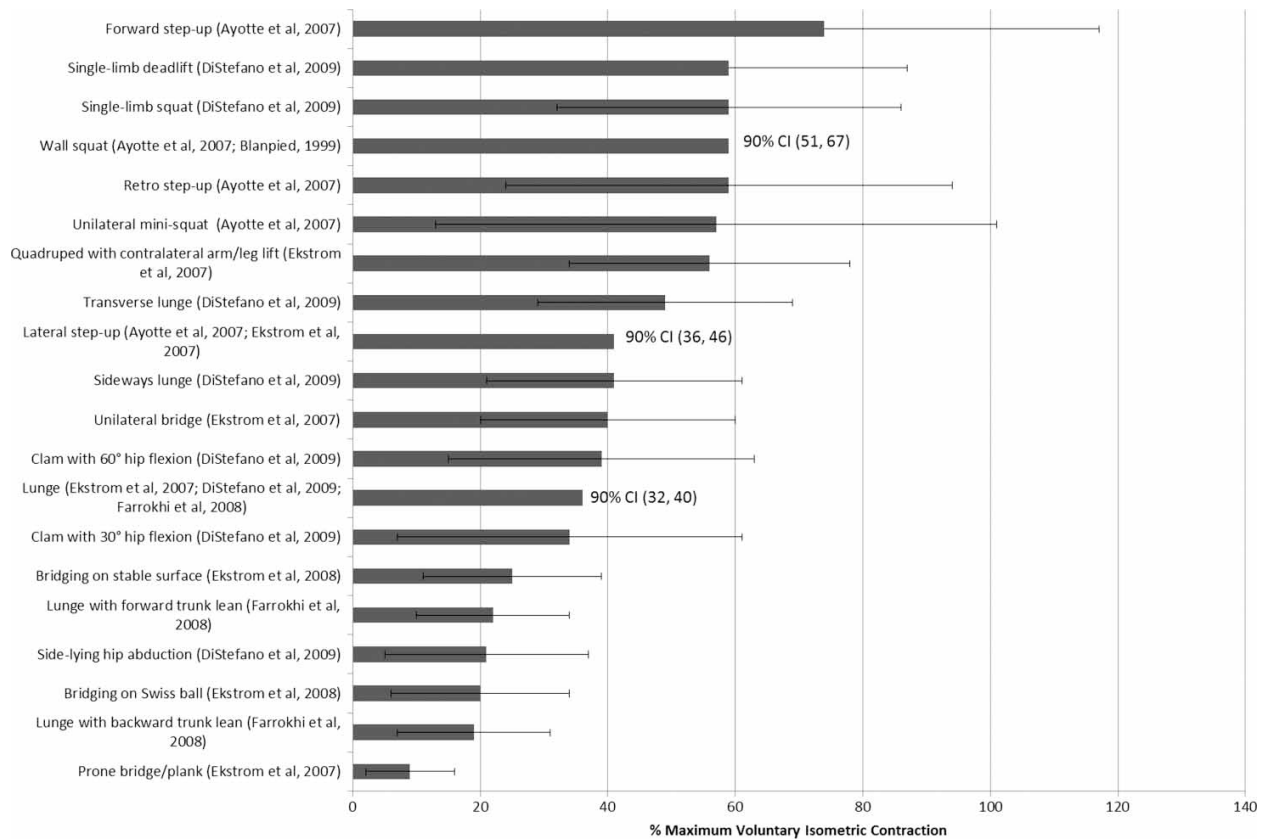


Figure 14. Classement des pourcentages de recrutement du muscle grand fessier par rapport à la contraction maximale isométrique lors de différents exercices. (Tirée de Reiman et al., 2012).

La figure 15 illustre l'activation du muscle moyen fessier au courant de différents exercices populaires. Encore une fois, le squat unilatéral représente un exercice qui permet de bien isoler le moyen fessier et supporte son utilisation dans le cadre d'exercice de réhabilitation et de stabilisation à la hanche (Barton et al., 2013; Reiman et al., 2012).

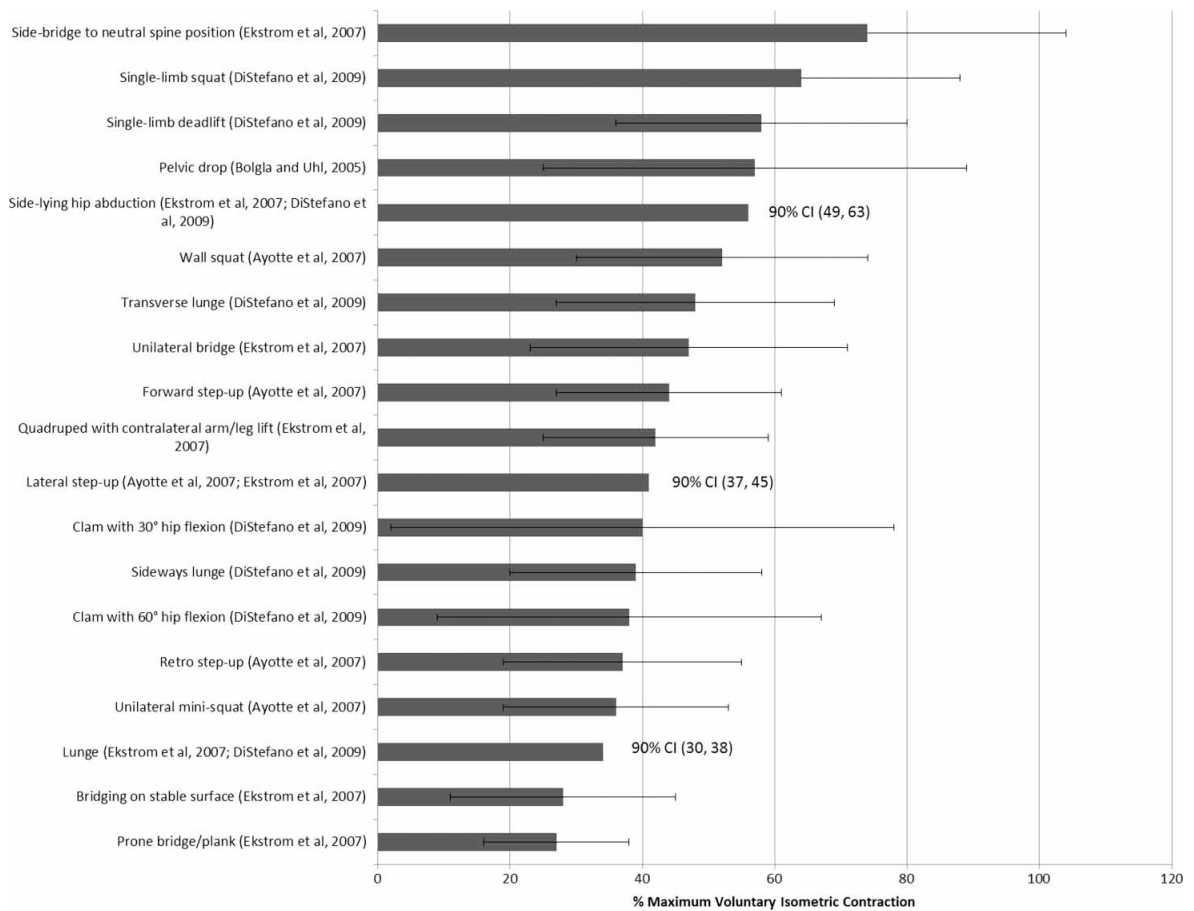


Figure 15. Classement des pourcentages de recrutement du muscle moyen fessier par rapport à la contraction maximale isométrique lors de différents exercices. (Tirée de Reiman et al., 2012).

De plus, l'exécution d'un squat arrière avec une grande charge avant une série de squats sautés augmenterait la performance de sauts, de la hauteur du saut, de même que la force de réaction au sol (Weber et al., 2008). Par exemple, Weber et al. (Weber et al., 2008) ont montré une augmentation de la performance au squat sauté suite à une pré-sollicitation d'un exercice de squat arrière à 85% d'1RM. Ainsi, l'activation musculaire en réponse à un exercice de squat semble permettre une augmentation de la performance subséquente explosive (Crow et al., 2012; Khamoui et al., 2009a; Kilduff et al., 2007; Gourgoulis et al., 2003; Smith et al., 2001; Young et al., 1998).

Considérant qu'une contraction maximale ou quasi-maximale d'un groupe musculaire dans les secondes ou minutes précédant une performance physique permettrait d'augmenter la quantité de travail pouvant être réalisée et d'améliorer la coordination inter-musculaire et la stabilité articulaire, le phénomène de PAP gagne à être exposé aux différents intervenants du milieu sportif. Malgré la complexité des modalités et variables pouvant influencer la PAP, les différentes études auprès des athlètes de haut niveau tendent à signifier les avantages que pourrait amener une telle pratique. Il est donc de mise, notamment en contexte sportif de haut niveau, qu'il est essentiel de contrôler soigneusement les différents paramètres d'une tâche de pré-sollicitation. En effet, ceux-ci vont directement avoir un impact sur l'observation d'une amélioration ou non de la performance et surtout, sur l'amplitude et le délai d'apparition de la fatigue, qui représente le principal obstacle au maintien et à l'amélioration des performances.



## **E) La fatigue neuromusculaire**

### **i. Définition**

La fatigue musculaire se définit comme étant une diminution transitoire dans la capacité de développer une quantité de force ou de puissance lors d'une activité soutenue ou intermittente (Enoka et Duchateau, 2008; Binder-Macleod et Kesar, 2005; Williams, 1997). La figure 16 illustre les résultats rapportés par Mendez-Villanueva et al. (2008) lors d'une tâche de 10 répétitions de sprints de 6 secondes sur ergocycle entrecoupés de périodes de repos de 30 secondes (tâche intermittente). Mendez-Villanueva et al. montrent l'impact de la fatigue sur la capacité de production d'énergie mécanique par la diminution de la puissance moyenne (24.1%;  $p < 0.001$ ) entre le premier sprint et le dernier sprint des sujets. La figure 17 démontre la différence entre la puissance musculaire instantanée du premier et du dernier sprint pour chaque seconde du sprint.

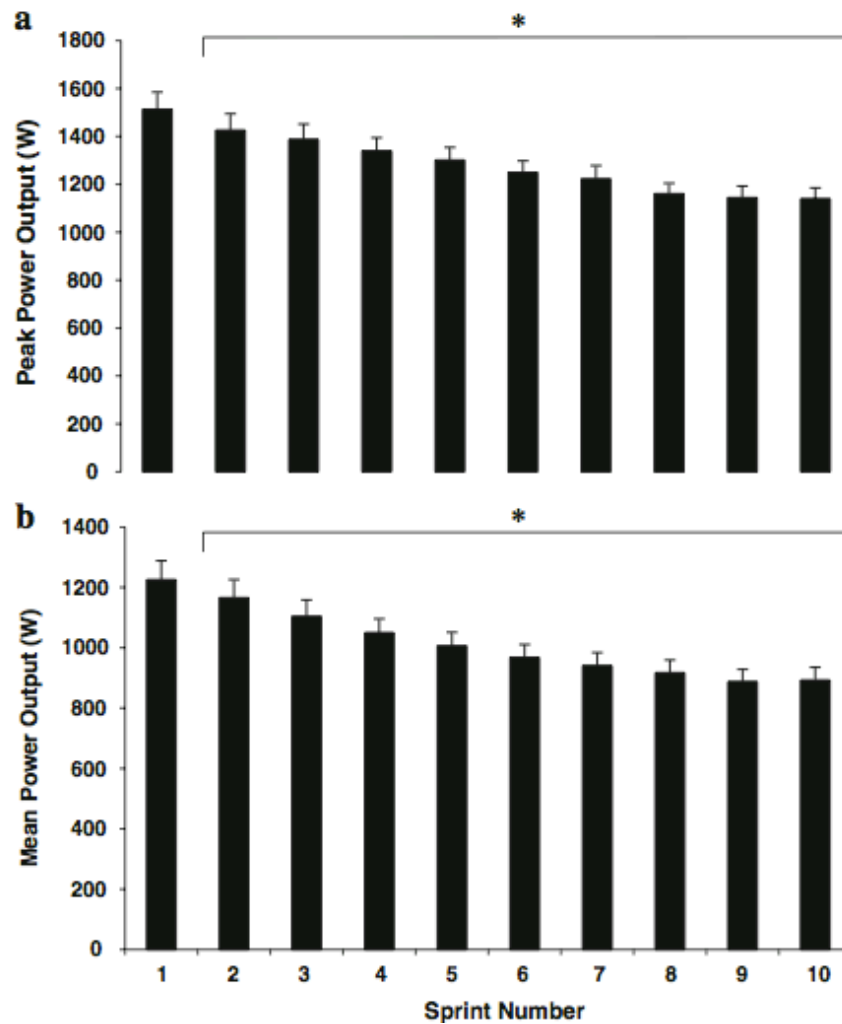


Figure 16. Pic moyen de puissance (a) et puissance moyenne (b) par sprint lors d'une tâche de 10 répétitions de sprints de 6 secondes sur ergocycle entrecoupés de périodes de repos de 30 secondes (tâche intermittente) (valeurs moyennes  $\pm$  écart-type) (n = 8). \*Significativement plus bas ( $p < 0.05$ ) comparativement au sprint 1. (Tirée de Mendez-Villanueva et al., 2008)

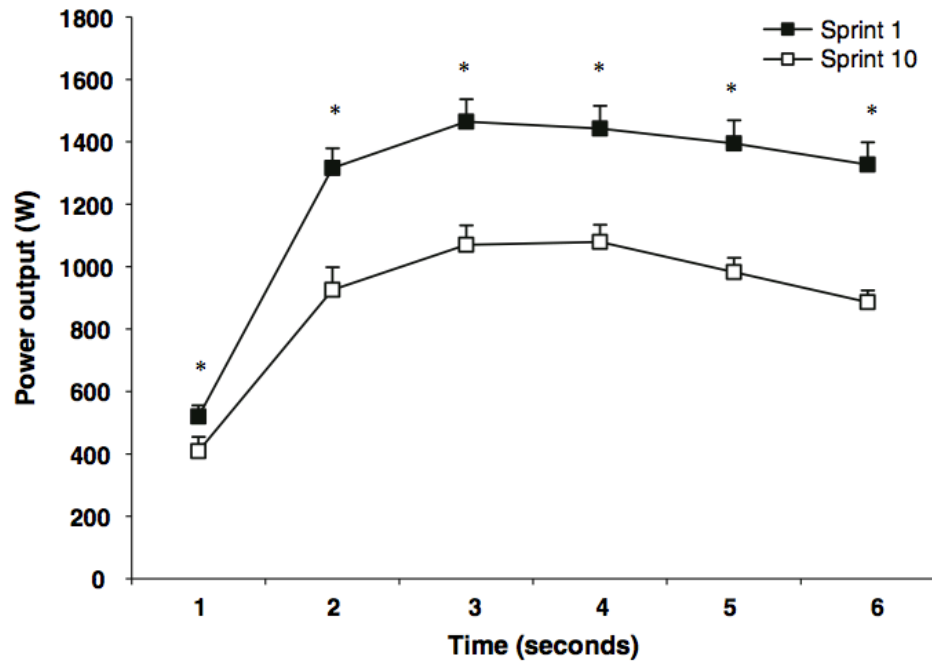


Figure 17. Puissance moyenne par rapport au temps des sprints 1 et 10 lors d'une de 10 répétitions de sprints de 6 secondes sur ergocycle entrecoupés de périodes de repos de 30 secondes (en valeur absolue, moyenne  $\pm$  SE (n = 8). \*Significativement plus bas ( $p < 0.01$ ) du 1er sprint (Tirée de Mendez-Villanueva et al., 2008)

Le degré de fatigue et, par conséquent, l'ampleur de la diminution de la performance, varie en fonction du type de fibres musculaires, des patrons d'activation, de la durée de l'activité, et de plusieurs facteurs environnementaux (Williams, 1997). Malgré les nombreux travaux portant sur la fatigue neuromusculaire, les causes exactes et directes sont reconnues comme étant multidimensionnelles et demeurent à être confirmées.

## **ii. Principaux mécanismes expliquant l'apparition de la fatigue musculaire**

Classiquement, la fatigue neuromusculaire est divisée en deux niveaux, soient central et périphérique, influençant différemment la génération de force (Billaut et Bishop, 2009; Garrandes et al., 2007). La fatigue centrale implique le système nerveux central tandis que la fatigue périphérique agit plutôt au niveau local (muscle et jonction neuromusculaire). Par contre, le type de fatigue qui se manifeste se différencie par le type de contraction à l'origine de la fatigue (Garrandes et al., 2007), tel que décrit dans les prochaines sections. L'ordre d'apparition de la fatigue (centrale ou périphérique) serait aussi fonction du type de contraction. Une contraction isométrique engendrerait une fatigue d'abord centrale, puis périphérique, alors que la contraction dynamique ferait l'inverse (Babault et al., 2006).

## **iii. Effets de la fatigue sur la coordination inter-musculaire: effets sur les patrons moteurs**

Suite à un exercice fatiguant, plusieurs facteurs biomécaniques et neuromusculaires sont altérés, tels que les patrons de recrutement, la coactivation, la cinématique, la cinétique et la raideur musculaire (Padua et al., 2006). Les ajustements neuromusculaires se produisent en réponse au mode de contraction principalement utilisé dans l'activité sportive pratiquée (Garrandes et al., 2007). Il a aussi été montré qu'en situation de fatigue, les stratégies compensatoires engendreraient une réorganisation de la structure du mouvement et l'apparition d'un nouveau patron moteur (James et al., 2010; Côté et al., 2002; Rodacki et al., 2002).

Tel que mentionné précédemment, la performance dépend entre autres de la capacité d'adaptation du système nerveux central à activer et désactiver (co-contraction) les muscles impliqués lors d'un effort, soit le recrutement musculaire, qui fait état de la coordination inter-musculaire (Billaut et al., 2005). La présence d'ajustements vient du fait que la fatigue et la coordination intermusculaire sont liées. En effet, en situation de fatigue, le délai d'activation et de désactivation des muscles serait modifié et le système nerveux central emploierait différentes stratégies compensatoires visant à atténuer l'effet de la fatigue sur la performance (Huffenus et al., 2006; Côté et al., 2002;). Conséquemment, en plus d'induire des changements sur la coordination motrice (Huffenus et al., 2006), la fatigue engendrerait une diminution du pic de force et de la capacité de maintenir un effort.

Ainsi, dans le but de maintenir une puissance maximale lors d'une tâche de sprint, par exemple, le système nerveux central doit recruter toutes les unités motrices disponibles à leur plus grande fréquence de décharge (Krustrup et al., 2004), de même qu'un maximum de fibres musculaires. Par exemple, lors d'une tâche intermittente de sprint sur vélo, le moment d'activation entre les extenseurs et les fléchisseurs du genou s'est vu modifié afin de palier aux contraintes musculaires et nerveuses engendrées par la fatigue (Billaut et al., 2005). Lors de tâches de sauts, les changements au niveau du contrôle neuromusculaire induits par la fatigue ont été montrés par l'altération des stratégies de coordination des membres inférieurs (Rodacki et al., 2002). Ces modifications impliquent aussi une stabilisation dynamique du genou affectée par la fatigue de la musculature de l'articulation (James et al., 2010), tel qu'introduit dans les sections précédentes.

Psek et Cafarelli (Psek et Cafarelli, 1993) ont noté que la fatigue d'un groupe musculaire altèrerait l'efficacité globale du mouvement en modifiant les patrons moteurs. En effet, en étudiant l'activation antagoniste des muscles en situation de fatigue, ils ont montré que la fatigue du vaste latéral augmentait l'activation du biceps fémoral, qui agit comme antagoniste lors de l'extension du genou.

En plus de l'impact sur les stratégies de recrutement et donc, sur la coordination, la fatigue cause un nombre important de changements au niveau du muscle, dont la diminution de la raideur musculaire, une diminution de la concentration de  $\text{Ca}^{2+}$  sarcoplasmique, une diminution de la concentration du  $\text{Ca}^{2+}$ . Ces facteurs résultent en une diminution du taux de montée de la force et de la force, se manifestant par une performance diminuée. À l'inverse, l'implication de la propriété catchlike, induisant une augmentation de la raideur musculaire et de la concentration du  $\text{Ca}^{2+}$  sarcoplasmique, pallierait en partie aux déficits associés à la fatigue (Binder-Macleod et Kesar, 2005).

Un autre fait notable est que la fatigue engendrerait une diminution de la précision de la proprioception et par conséquent, représenterait un facteur de risque de blessure articulaire (Gear, 2011). La proprioception serait atteinte après un exercice de haute et de basse intensité (Gear, 2011). Puisque les mécanismes de la proprioception sont étroitement liés au système nerveux central et que celui-ci l'est aussi au mécanisme de la PAP, la gestion de la fatigue devient d'autant plus importante en vue de la préparation physique d'un athlète.

À ce sujet, les athlètes seraient en mesure d'avoir une activation des unités motrices plus élevée en réponse à un exercice fatigant en comparaison avec les sujets non-athlètes, possiblement en raison de leurs adaptations à l'entraînement (Ahtiainen et Häkkinen, 2009). Ceci pourrait donc laisser croire que les stratégies de recrutement seraient plus efficaces chez les athlètes et par conséquent, qu'il serait plus facile pour ces derniers de protéger leurs structures articulaires, malgré une plus grande charge appliquée sur celles-ci.

#### **iv. Le signal EMG en réponse à la fatigue musculaire**

L'utilisation des signaux électromyographiques (EMG) est l'une des méthodes afin d'étudier l'évolution de la fatigue lors d'une tâche fatigante dynamique (Macdonald et al., 2008). L'étude des signaux EMG permet d'évaluer la réponse et l'implication des muscles observés afin d'évaluer le niveau de fatigue, de même que la coordination entre muscles agonistes et antagonistes en réponse à un exercice.

Les travaux de Rodacki et al. (2001) ont permis de montrer l'existence d'un patron moteur constant indépendant de la quantité de force générée par le muscle. Ainsi, la séquence du mouvement et de temps, de même que l'amplitude du muscle et des mouvements articulaires lors de sauts sont comparables pour des sujets différents (Jacobs et Van Ingen Schenau, 1992). Malgré le fait que l'amplitude EMG des muscles extenseurs et fléchisseurs du genou augmente à la fin de l'exercice épuisant, les patrons EMG demeurent similaires à ceux observés en début d'exercice, mais ce, avant l'apparition de la fatigue. En situation de fatigue, la fréquence du signal diminue lors de contractions prolongées de même que lors de contractions maximales (Moxham et al.,

1982). De plus, les variables EMG seraient sensibles au phénomène d'apprentissage de la tâche (Macdonald et al., 2008), pouvant ainsi expliquer les disparités observées dans les différentes études portant sur le phénomène de la PAP.

#### iv. a) Le signal EMG en réponse à un exercice fatiguant sous-maximal

En réponse à une contraction sous-maximale, l'amplitude EMG (quantifiée par la RMS) augmente et la fréquence moyenne diminue. Cette modification de la fréquence permet d'identifier la fatigue musculaire locale (Basmajian, 1978). Cette diminution est expliquée par les modifications de la vitesse de conduction des potentiels d'action et par la diminution de la fréquence de décharge des unités motrices (Moritani et Muro, 1987). En réponse à un exercice fatiguant, les mécanismes périphériques ayant lieu résultent en une diminution de la capacité de générer de la force par la cellule musculaire et par conséquent, en une augmentation de l'influx nerveux afin de maintenir la quantité de force donnée (Pincivero et al., 2000; Gerdle et al., 1997). Afin de maintenir l'intensité de l'exercice malgré l'apparition de la fatigue dans les fibres actives, des fibres additionnelles sont activées, expliquant l'augmentation de l'amplitude EMG. Cependant, une faible augmentation dans la fréquence d'excitation a été rapportée dans des exercices isométriques intermittents, expliquant la faible augmentation de l'amplitude EMG ayant été observée (Moritani et al., 1986).

#### iv. b) Le signal EMG en réponse à un exercice fatiguant maximal

Cependant, en réponse à un effort maximal soutenu, l'amplitude du signal électromyographique se voit diminuée, de même que la fréquence moyenne et médiane



(Schillings et al., 2003; Moritani et al., 1986). Le niveau de fatigue des fibres rapides, qui sont les principales responsables de la production d'énergie lors de tâches à haute intensité, expliquerait la diminution de la puissance pouvant être générée lors d'une tâche subséquente (Karatzaféri et al., 2001). Malgré le fait que les fibres musculaires lentes et les muscles accessoires soient largement recrutés afin de palier à l'incapacité de développer la quantité de puissance demandée, ils ne sont pas en mesure de produire la même quantité d'énergie mécanique que les fibres rapides initialement, expliquant la diminution de la performance.

Lors d'une tâche maximale isométrique des muscles fléchisseurs dorsaux de la cheville, Kent-Braun et al. (Kent-Braun, 1999) ont enregistré une diminution du signal EMG à 72.6% ( $\pm$  9.1%) de la valeur initiale établie lors d'une MVC. Ces résultats appuient aussi ceux de Billaut et al. (Billaut et al., 2005), qui ont montré une diminution de l'activation EMG accompagnée d'une diminution de la puissance générée. Ils ont aussi noté que la coordination entre les muscles fléchisseurs et extenseurs du genou était modifiée par la diminution de la coactivation (90.2 ms) sur 10 sprints, qui serait attribuable à une activation antagoniste apparaissant plus tôt avec la fatigue.

En outre, l'amplitude EMG d'un muscle antagoniste bi-articulaire serait réduite par l'état de fatigue des muscles responsables de la production de puissance lors de sprints répétés sur vélo (Hautier et al., 2000). Miyamoto et al. (Miyamoto et al., 2011) ont enregistré une activité EMG des muscles agonistes réduite pendant la pré-sollicitation et au tout début d'une tâche maximale concentrique. Ainsi, la fatigue apparaîtrait pendant l'activité de pré-sollicitation et pourrait par conséquent atténuer l'augmentation de la

performance subséquente (Miyamoto et Kanehisa, 2012).

Bien qu'une diminution de l'amplitude EMG soit généralement enregistrée lors d'un effort maximal, Babault et al. (Babault et al., 2006), n'ont montré aucune modification significative de l'amplitude EMG (RMS) lors d'un protocole d'extensions maximales du genou de 3 séries de 30 répétitions. Cependant, lors de 3 contractions isométriques maximales successives préalables entrecoupées d'une minute, l'amplitude EMG était significativement réduite lors des 3 séries ( $-24.9 \pm 14.9\%$ ,  $-24.7 \pm 24.8\%$ , and  $23.3 \pm 24.1\%$ ;  $p < 0.01$ ). Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Kay et al. (2000) (Kay et al., 2000), qui ont enregistré un maintien des valeurs EMG dans les conditions concentriques et excentriques ( $95 \pm 27\%$  and  $93 \pm 21\%$ ), mais une importante diminution de l'activité EMG à  $38\%$  ( $\pm 13\%$ ) de la valeur initiale suite à un protocole isométrique.

Cependant, les modifications de la force, des amplitudes et des fréquences EMG enregistrées ne sont pas entièrement expliquées par les stratégies compensatoires issues du recrutement (composante neurale) (G. Y. Millet & Lepers, 2004; Perrey, et al., 2010). L'EMG a aussi une composante périphérique non-négligeable qui doit être considérée dans l'interprétation du signal EMG. Ainsi, en plus de pouvoir être modulé par une diminution de la commande motrice, l'activité EMG peut aussi être réduite par une réduction de la transmission neuromusculaire (Perrey et al., 2010). En effet, la diminution du signal EMG brut sans prise en compte de la conduction des potentiels d'action sur membrane post-synaptique et des changements de la dépolarisation de la membrane (amplitude de l'onde du muscle ou *M-Wave amplitude*), permet difficilement

d'obtenir une évaluation complète de l'activité neuromusculaire globale et par conséquent, de déterminer si les modifications de l'EMG sont dues aux stratégies compensatoires de la commande nerveuse ou en partie aux perturbations de propagation périphérique. Une diminution de l'amplitude et de la durée de l'onde du muscle (*M-Wave*) suggère que la transmission et la conduction des potentiels d'action est altérée pendant la réalisation d'une tâche (Perrey et al., 2010). Les caractéristiques du muscle étudié ainsi que le type de contraction joueraient aussi un rôle dans les modifications de l'onde du muscle lors d'un exercice de sprint répétés (Perrey et al., 2010). Par exemple, pendant des contractions à haute intensité, les pompes  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  ne peuvent pas accumuler de nouveau le  $\text{K}^+$  dans les cellules et par conséquent, une concentration de  $\text{K}^+$  presque doublée peut se retrouver dans l'espace extracellulaire (Clausen et al., 1998). Une telle concentration de  $\text{K}^+$  pourrait ainsi temporairement causer une dépolarisation de la membrane et en diminuer l'excitabilité, modifiant le signal EMG enregistré.

#### **v. La fatigue et le risque de blessure**

Il a été démontré que l'incidence de blessures est plus élevée en fin de compétition et d'entraînement, en raison de l'état de fatigue des athlètes (Kersey et Rowan, 1983). Les altérations neuromusculaires qui apparaissent avec la fatigue pourraient augmenter le risque de blessure par la diminution de la capacité d'absorber les chocs et de la coordination du système locomoteur (James et al., 2010). L'augmentation de la charge (stress sur les structures passives) et la diminution du contrôle neuromusculaire augmentent le risque de blessure en augmentant le stress sur les structures passives (James et al., 2010).

Tel que mentionné précédemment, la co-contraction a un rôle à jouer dans la prévention des blessures de par son impact sur l'augmentation de la stabilité articulaire (Pincivero et al., 2000). Cependant, en situation de fatigue, l'altération des patrons moteurs et de la rigidité articulaire peut représenter un facteur de risque dans l'occurrence de blessure.

#### **vi. Fatigue et spécificité de l'entraînement**

Plusieurs facteurs expliqueraient une réponse à la fatigue différente chez les athlètes. Bien que les athlètes de disciplines explosives atteignent une force maximale plus élevée que les athlètes entraînés en endurance (Garrandes et al., 2007; Pääsuke et al., 1999), les sujets avec une plus grande proportion de fibres rapides seraient plus sensibles à la fatigue que les sujets comportant une plus grande proportion de fibres lentes, tel que montré par Colliander et al. (1988) (Colliander et al., 1988). La figure 18 illustre que les athlètes en puissance seraient plus affectés par la fatigue que les athlètes d'endurance (Garrandes et al., 2007).

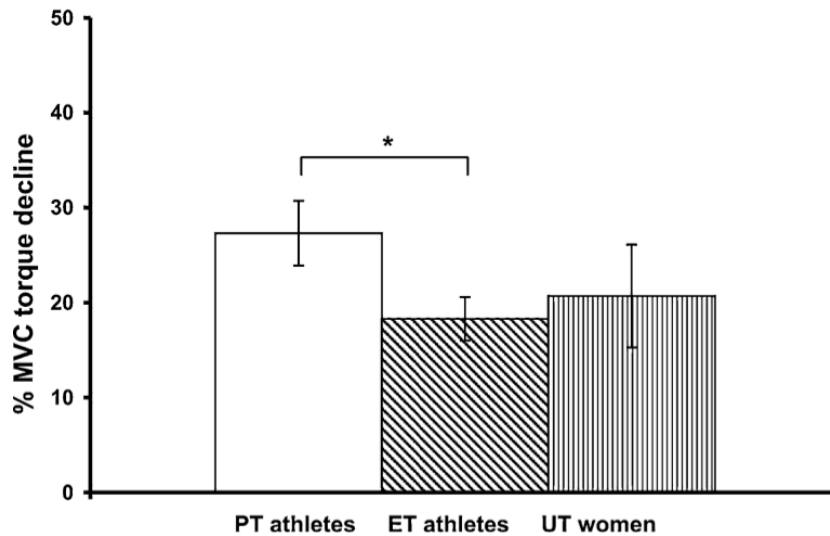


Figure 18. Pourcentage de diminution de la puissance (moyenne  $\pm$  écart-type) des muscles extenseurs du genou pendant une contraction maximale volontaire isométrique de 10-s chez des athlètes féminines en puissance (PT, n=12), en endurance (ET, n=12) et non-entraînées (UT, n=12). \*Significativement différent ( $p < 0.05$ ) (Tirée de Pääsuke et al., 1999).

En outre, le niveau et l'expérience en entraînement auraient un impact sur l'organisation fonctionnelle du système neuromusculaire. Les athlètes de puissance seraient plus affectés par les exercices fatigants que les athlètes d'endurance (Garrandes et al., 2007). Malgré que les mécanismes expliquant ces différences soient peu clairs, plus la quantité de force exercée par un muscle ou une unité motrice lors est élevée, plus le muscle semble se fatiguer (Hunter et Enoka, 2001).

## **F) Potentialisation de post-activation et la fatigue**

Bien que l'utilisation de protocoles de PAP puisse aussi être une stratégie pour augmenter les performances, un grand niveau de fatigue est généré suite à une activité de pré-sollicitation maximale (Tillin et Bishop, 2009 ; Hodgson et al., 2005; Sale, 2002). La PAP et la fatigue seraient reconnues pour coexister dans le muscle squelettique. Bien que cette co-existence soit inévitable source de résultats conflictuels dans la littérature par rapport aux effets de la PAP sur la performance, elle serait essentielle (Chiu et al., 2004; Rassier et Macintosh, 2000). Dans le but d'optimiser la performance lors d'une activité subséquente, la fatigue doit se dissiper à un rythme plus rapide que les effets potentialisateurs de la PAP (Bevan et al., 2009; Docherty et Hodgson, 2007; Sale, 2002; Rassier et Macintosh, 2000). Ainsi, l'équilibre entre ces deux éléments et la charge résultent en la capacité du muscle de générer une quantité de force subséquemment à une pré-sollicitation et doit être manipulé adéquatement (Tillin et Bishop, 2009). La figure 1 illustre aussi la co-existence entre la PAP et la fatigue.

### **i. Étude des manifestations de la fatigue dans le muscle squelettique**

Tel que décrit précédemment, la performance peut être affectée par une diminution de la commande motrice (composante centrale), mais aussi par des changements périphériques (Girard et al., 2008).

Les exercices d'intensité maximale induisent une fatigue périphérique de haute fréquence (Tomazin et al., 2011) en raison de la fréquence d'influx de potentiels d'action nécessaires au recrutement de fibres musculaires rapides (Tomazin et al., 2011) et par l'altération de la propagation ces potentiels d'actions au niveau de la membrane post-

synaptique (Perrey et al., 2010). Celle-ci est observable lorsqu'une activité résulte en une diminution de la force maximale sans diminution de force lors d'efforts sous-maximaux (Rassier et Macintosh, 2000). L'amplitude réduite de l'onde de muscle, discuté précédemment, témoigne aussi d'une fatigue de haute fréquence puisqu'elle est attribuable à des modifications au niveau des jonctions neuromusculaires et/ou à des modifications de l'excitabilité de la membrane post-synaptique en raison des changements de la concentration du  $K^+$  dans l'espace extracellulaire (Jones et Lees, 2003).

La fatigue de basse fréquence se caractérise plutôt par une diminution de la force lors de contractions sous-maximales, alors que la force maximale n'est pas altérée. Cette fatigue est plutôt associée à l'échec du couplage excitation-contraction (Perrey et al., 2010). Les travaux de Tomazin et al. (Tomazin et al., 2011) portant sur la fatigue sur différentes distances de sprint (100m, 200m, 400m) a pu montrer la présence de fatigue de basse fréquence progressive accompagnée d'une diminution de la commande nerveuse et d'une augmentation du temps de sprint. Par contre, la force maximale n'a été diminuée qu'après le sprint de 400m, corroborant l'implication de mécanismes compensatoires en réponse à la fatigue pendant les sprints plus courts.

L'utilisation de protocoles de PAP pourrait donc avoir un impact sur la performance, dans la mesure où la fréquence de stimulation affecte la production de force du muscle. Les stimulations de hautes fréquences sont associées à une plus grande production de force et à un niveau de fatigue supérieur que sont associées les basses fréquences de stimulation (Bigland-Ritchie, et al., 1979; Binder-Macleod et al., 1995). Quant à

l'induction de basses fréquences, elles diminueraient le taux d'apparition de la fatigue, mais n'engendreraient pas d'augmentation suffisante de la force suite à une pré-sollicitation (Lee et al., 1999). L'activité de pré-sollicitation pourrait cependant augmenter la force issues de basses fréquences en raison des effets de la PAP, mais pourrait aussi diminuer la force de haute fréquence dans le cas de la fatigue (Sale, 2002).

L'utilisation de la stimulation neuromusculaire intra-cutanée (NMES) a été étudiée relativement à la fatigue de basse fréquence. Miyamoto et Kanehisa (2012) ont montré que la NMES minimiserait la fatigue centrale en guise de contraction de pré-sollicitation puisqu'elle contournerait l'aspect "volontaire" de la contraction musculaire. En effet, leurs résultats ont noté qu'une stimulation de basse fréquence d'une durée de 10 secondes à 60% de la contraction maximale volontaire (MVC) a engendré une meilleure potentialisation tétanique qu'une contraction volontaire de 10 secondes à la même intensité d'exécution (Miyamoto et Kanehisa, 2012). Or, dans un contexte sportif, la NMES peut s'avérer difficilement praticable et il devient important de développer des outils simples permettant d'optimiser la performance.

La propriété "cathlike", telle que définie précédemment, est particulièrement efficace lorsque le muscle est en condition de fatigue de basse fréquence. Le muscle en est alors à une grande perte de force accompagnée ou résultant d'une diminution de la libération de  $Ca^{2+}$  sarcoplasmique (Binder-Macleod et Kesar, 2005).

Les effets d'une pré-sollicitation sur les différentes manifestations de la fatigue mentionnées ci-dessus démontrent l'importance que pourrait avoir une telle intervention



auprès des athlètes. Par contre, la gestion simultanée de la fatigue et de la PAP, de même que la nature de l'activité de pré-sollicitation en fonction du type de fatigue engendrée, complexifient grandement l'utilisation de cette méthode dans le cadre d'interventions sur le terrain.

Outre les effets de la potentialisation reconnus sur la performance des membres inférieurs et supérieurs (bien que controversés), la capacité des muscles de la hanche à supporter une charge et à répondre à un tel stimulus d'entraînement est jusqu'à ce jour peu exploitée, bien que cruciale. Selon Crow et al. (2012), les tâches de pré-sollicitation des muscles fessiers, avec de faibles charges externes, augmenteraient de manière significative la performance lors de sauts. En outre, le groupe musculaire des fessiers pourrait jouer un rôle clé dans la stabilisation de l'articulation (Newton et Kraemer, 1994) et l'exécution de mouvements explosifs des membres inférieurs, comme les sauts et les sprints (Crow et al. 2012).

## **G) Justification et objectifs du projet de recherche**

Dans la plupart des sports, la force, la vitesse et la stabilité au niveau des membres inférieurs sont des déterminants de la performance. Un des sports pour lequel ces trois facteurs physiques sont importants est le patin de vitesse. L'efficacité (rendement) avec laquelle les extensions (coups de patins) sont exécutées a un impact notable sur la performance. Ainsi, une possible amélioration de la coordination et du recrutement des muscles des membres inférieurs pourrait avoir un incidence directe sur la performance sur glace.

Il est reconnu que l'effort musculaire développé par un muscle ou un groupe musculaire peut être optimisé par la contraction préalable d'un muscle qui s'associe avec un ou plusieurs autres pour exécuter un mouvement. Ce phénomène, appelé «potentialisation de post-activation», est donc caractérisé par une augmentation de la quantité de travail musculaire pouvant être effectuée et pourrait retarder la fatigue. Ce gain de force a été observé à plusieurs reprises en analysant les modifications de la force générée lors d'un exercice et avec le niveau d'activation musculaire par la réponse des signaux électriques.

Cependant, nous ignorons si ce phénomène peut aussi être observé au niveau des muscles stabilisateurs des membres inférieurs (grand et moyen fessier, quadriceps, ischio-jambiers) et ainsi modifier les performances des patineurs. Nous ignorons aussi l'impact qu'une telle pré-sollicitation sur la coordination pluri-articulaire, la stabilisation, la fatigue et la puissance générée au niveau des membres inférieurs.

À la lumière des connaissances sur les différents phénomènes présentés dans ce manuscrit et en reproduisant les exigences physiques d'une course de 1000 mètres en patinage de vitesse sur courte piste, deux objectifs de projet ont été proposés.

L'objectif primaire était d'étudier dans quelle mesure la pré-sollicitation des muscles stabilisateurs pouvait être associée à une amélioration de la performance (gain en puissance). Celui-ci visait donc à déterminer s'il était possible d'améliorer la performance lors de tests de sauts répétés pour ensuite transférer ces acquis au profit des protocoles d'entraînement en préparation physique ou en contexte de compétition.

Le second objectif proposé était d'étudier si la pré-sollicitation des muscles stabilisateurs pouvait aussi être associée à des modifications de la coordination musculaire et de la stabilité à la hanche lors d'une même tâche épuisante d'extensions répétées à la hanche, indépendamment ou accompagné d'un gain en puissance. Les effets de la pré-sollicitation sur les stratégies de recrutement étaient étudiées dans une optique de prévention de blessures au niveau des membres inférieurs et du bas du dos chez les patineurs de courte piste.

Puisqu'un 1) exercice unilatéral des membres inférieurs (Boudreau et al., 2009; De Ruyter et al., 2006) pour lequel 2) plusieurs répétitions d'une tâche de pré-sollicitation maximale isométrique (Rixon et al., 2007; French et al., 2003) 3) de 5 à 6 secondes totales (Miyamoto et Kanehisa, 2012) seraient optimaux pour engendrer le phénomène de PAP subséquent à une tâche explosive (Tillin et Bishop, 2009), le protocole tel que décrit dans l'article qui suit a été mis sur pied.

## **H) Hypothèses de travail**

Puisque l'effet potentialisateur serait spécifique aux muscles impliqués lors de la pré-sollicitation (Jo et al. 2010, Sale 2002) et serait associé au niveau d'entraînement (Duthie, G.M. et al. 2002), nous avons formulé les hypothèses suivantes :

- 1) La contraction préalable (pré-sollicitation) des muscles stabilisateurs des membres inférieurs entraînera la production d'une plus grande puissance mécanique;
- 2) Cette augmentation de la puissance mécanique sera associée à une modification du patron de recrutement des muscles sollicités lors de l'exécution du squat et;
- 3) La quantité de travail totale pouvant être complétée sera augmentée et l'apparition de la fatigue, retardée.

L'article qui suit - *Effect of lower body pre-activation on multi-segment coordination and performance during repeated vertical jumps.* - synthétise l'ensemble du projet présenté.

**Title: Effect of lower body pre-activation on multi-segment coordination and performance during repeated vertical jumps.**

**Running title: Effect of post-activation potentiation on multi-segment coordination**

Type of manuscript: original article

Word count: abstract = 449; manuscript: 5573 words

Number of references: 86

Number of tables: 0

Number of figures: 7

Number of appendix: 1

**Authors:** Evelyne Chicoine<sup>1</sup>, David Amarantini<sup>2</sup>, Fabien Dal Maso<sup>3</sup> and Jonathan Tremblay<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Département de kinésiologie, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada

<sup>2</sup> PRISSMH Lab, Université Paul-Sabatier, Toulouse, France

<sup>3</sup> Laboratoire de simulation et de modélisation du mouvement, Département de kinésiologie, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada

<sup>4</sup> Institut national du sport du Québec, Montréal, QC, Canada

**Corresponding authors:**

David Amarantini, PRISSMH EA 4561 - F2SMH, Pôle Sport, Université Paul-Sabatier, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 9, France; Tel. +33 (0)5 61 55 65 46

Jonathan Tremblay, Département de Kinésiologie, Université de Montréal, CP 6128, Succursale Centre-ville, Montréal, Québec (Canada), H3C 3J7; Tel. 514-343-2038

There were no conflict of interest for the completion of this study.

## ABSTRACT

**Purpose:** The aim of the present study was to describe the effects of an isometric squat pre-activation on multi-segment coordination and performance during a fatiguing exercise.

**Method:** Six short-track speed skating athletes (3 males and 3 females; age:  $20.2 \pm 2.8$  years; height:  $1.67 \pm 0.13$  m; mass:  $66.0 \pm 11.1$  kg; all data reported as mean  $\pm$  SD) volunteered to participate in the study. During control sessions (CON), subjects performed 2 sets of 9 blocks of 6 maximal squat jumps with 5 s isometric squats between blocks and 5 min rest between sets. Experimental sessions (EXP) were identical to CON, but involved 2 x 3 s of a potentiating exercise (unilateral isometric squats against a fixed bar) 5 min before to the first set of 9 blocks, resulting in a bilateral pre-activation, an intending to target primarily the lower body hip stabilizers and leg flexors and extensors. All subjects participated in 4 sessions (2 x CON + 2 x EXP) in a randomized order to increase the sample size. Jumping average peak power was measured using a linear encoder fixed at the hips; EMG amplitude, median frequency, angular velocity and acceleration were measured using a wireless EMG system coupled with accelerometers; the first and last blocks of jumps were recorded for each set.

**Results:** There was no difference between CON and EXP in power output, although a significant decrease between blocks was observed ( $p < 0.008$ ). EMG mean frequency decreased for all muscles in both conditions, but remained unchanged for biceps femoris (BF) and anterior tibialis (TA). Gluteus maximus (Gmax) and TA were significantly different from CON. EMG root mean square (RMS) remained unchanged for all muscles during both conditions, but decreased for right GM ( $p < 0.015$ ) and left TA ( $p < 0.034$ ) from the first to last block of jumps. First set of hip angular velocity was decreased in EXP



condition but not in CON, but increased in EXP second set ( $p < 0.0009$ ) but not in CON. Ankle angular acceleration significantly decreased throughout the exercise protocol in both conditions ( $p < 0.048$ ).

**Conclusion:** Lower-body maximal isometric pre-activation did not significantly improve repetitive jump performance or the coordination of hip stabilizers in short-track speed skating athletes, and did not modify recruitment patterns during repeated squats. However, Gmax and TA mean frequencies suggest less fatigue with pre-activation possibly due in part to compensation strategies in the lower body during execution. These results show that potentiation of a muscle group through a pre-activation exercise could lead to a reorganization of motor patterns of the non-dominant leg, leading to a reduction in some measures of fatigue in repeated jumps.

**Keywords:** postactivation potentiation, electromyography, fatigue, coordination

## INTRODUCTION

Performance in many sports activities is dependent upon the contraction of single or multiple muscles in a coordinated fashion in order to produce external force or power. The performance of muscle is affected by its contractile history (Hodgson et al., 2005; Rassier and Macintosh, 2000; Sale, 2002), thereupon, a sequence of contractions can lead to increases in force and power production and thus, performance (Docherty and Hodgson, 2007). Post-activation potentiation (PAP) is known to be a phenomenon by which a muscle or muscle group performance is enhanced by a prior conditioning activity (Hodgson et al., 2005; Robbins, 2005; Tillin and Bishop, 2009), here called pre-activation.

Several mechanisms responsible for the enhanced rate of force development as a result of PAP (Baudry and Duchateau, 2006) are still unclear. Research so far suggests contributing factors could be acting at peripheral, central and skeletal levels (Seitz, 2011). The underlying myogenic and neurogenic mechanisms are recognized to be an increase in of myosin regulatory light chains (MRLC) phosphorylation, an increase in the firing rate of motor neurons (Tillin and Bishop, 2009; Hanson et al., 2007; Hodgson et al., 2005; Chiu et al., 2003; Sale, 2002; Young, 1992) and the catchlike property (or “extra-torque”) of the muscle (Frigon et al., 2011; Seitz, 2011; Binder-Macleod and Kesar, 2005; Franke and Awiszus, 2004; Mahlfeld et al., 2004). Other individual factors may also contribute to the manifestation of PAP such as: initial muscle strength, fiber-type distribution, training level and power-strength ratio (Batista et al. 2011; Tillin and Bishop, 2009; Rixon et al., 2007).

PAP is commonly used prior to an explosive activity in order to potentiate mechanical power output (Rixon et al., 2007; Baudry and Duchateau, 2006; Ebben et al., 2000; Güllich and Schmidtbleicher, 1996). It is acknowledged that high-load or high-intensity pre-activation are to create greater PAP effect (Comyns et al., 2007; Rahimi, 2007; Rixon et al., 2007; Chiu et al., 2004; Duthie et al., 2002; Young et al., 1998), but there are also reports of a significant impact of low-load pre-activation on PAP (Crow et al., 2012; Tsao and Hodges, 2007). Although findings related to the most effective pre-activation contraction type are equivocal, it seems that isometric contractions are more likely to activate the peripheral mechanisms of PAP (Esformes et al. 2011; Sale, 2002), particularly in subsequent dynamic tasks (Tillin and Bishop, 2009; Rixon et al., 2007; De Ruiter et al., 2006; French et al., 2003). Thus, pre-activation contractions could have a cumulative effect in triggering PAP (Sale, 2002; Gossen and Sale, 2000).

Although knee extensors are the primary power producers in dynamic jumping exercises, multi-joint tasks also involve muscles of the hip with an increase in their activation and neuromuscular stabilization activity (Boudreau et al., 2009). Consequently, strength and coordination of the muscles of the hip complex significantly contribute to the overall performance in multi-joint closed chain exercise such as squats or jumps. As a matter of fact, the gluteal muscle group has been shown to have a direct impact on hip stability (Reiman et al., 2012; Izquierdo et al., 2002) and lower body explosive movements (Barton et al., 2013; Crow et al., 2012).

Mechanisms occurring consequently to pre-activation have also been exploited during interventions in prevention of lower back injury (Barton et al., 2013; Cambridge, et al., 2012; Carregaro et al., 2011; Gabriel, et al., 2006). Since hip dysfunction has been related to the prevalence of knee and low back injuries (Dwyer et al., 2010; Kibler, Press, and Sciascia, 2006; Powers, 2010), protocols involving lower limb pre-activation leading to an increase in co-contraction and joint stabilization has brought interest in such research. Indeed, coordination changes resulting from agonist and antagonist coactivation (Kellis and Kouvelioti, 2009) demonstrated to act on joint stability (Van Dieën et al., 2011; Moorhouse and Granata, 2007; Baratta et al., 1988; Kellis, 1998). Although decreases in antagonist co-contraction is associated with an increase in agonist muscle strength, resulting from a better inter-muscle coordination, antagonist action is still necessary for joint control and longterm health (Gabriel et al., 2006; Baratta et al., 1988).

While PAP is used as a strategy for performance enhancement, a high level of fatigue is induced consequently to a maximal conditioning activity (Tillin and Bishop, 2009; Hodgson et al., 2005; Sale, 2002;). Although coexistence between PAP and fatigue has been shown to be inevitable, thus essential (Chiu et al., 2004; Rassier and Macintosh, 2000), the balance between these two elements and loading variables have to be manage adequately (Tillin and Bishop, 2009) in order to possibly increase performance. Differences between recreationally trained subjects and elite athletes have been listed, and PAP would get a greater response in enhancing explosive performances in trained athlete because of their favorable individual factors (Rixon et al., 2007; Chiu et al., 2003; Duthie et al., 2002; Izquierdo et al., 2002). Despite the fact they have a greater

sensibility to trigger PAP (Chiu et al., 2003), power-trained athlete would be more affected by fatigue than endurance-trained athletes (Garrandes et al., 2007).

Following these findings, the possibility of enhancing an athlete's performance while preventing him or her from any possible injury should be more than wanted in today's industry. Since lower limbs power is one of the principal determinant in performance for the implication in motion, it is to the athlete's advantage to potentialize its efficiency and health (Crow et al., 2012).

The purpose of this study was to determine the effect of a lower body pre-activation on multi-segment coordination and performance during a sequence of fatiguing repeated vertical jumps. It was hypothesized that prior lower-body pre-activation would result in improved muscle recruitment patterns possibly leading to either a higher average mechanical power production or delayed expression of fatigue in the jumping task, therefore enhancing hip joint stabilization.

## **METHODS**

### **Participants**

Six short-track speed skating athletes that were either at the provincial or national team level for a minimum of 3 years volunteered for the study (3 males and 3 females; age:  $20.2 \pm 2.8$  years; height:  $1.67 \pm 0.12$  m; mass:  $66.0 \pm 11.1$  kg; all data reported as mean  $\pm$  SD). Before participation, written informed consent was obtained from adult

participants and from the parents of minor athletes. The protocol was in accordance with procedures approved by Montreal University ethics committee in health research.

## **Materials**

A TENDO power and speed analyzer (Tendo Sports Machine, Trencin, Slovak Republic) was used to determine power output. After suitable skin preparation (Hermens et al., 2000), surface EMG electrodes equipped with an integrated triaxial accelerometer were fixed on the gluteus medius (Gmed), gluteus maximus (Gmax), vastus lateralis (VM), biceps femoris (BF), rectus femoris (RF), gastrocnemius medialis (GM) and tibialis anterior (TA) on each leg. Surface EMG signals were recorded using the Trigno™ wireless EMG system (Delsys, Trigno Wireless System, Boston, MA, USA) and stored on a computer using the Delsys EMGworks software (v2008, Delsys, EMGworks Software, Boston, MA). EMG and accelerometry data were collected at 1000 and 48 Hz respectively.

2D movement patterns of discrete anatomical reference points were recorded at 30 Hz using a single digital camera (Sony Cyber-Shot DSC-HX100) positioned perpendicular to the sagittal plane of the subject. Assuming symmetry between left and right sides, a total of 6 markers were placed unilaterally on the 5th metatarsal head, lateral malleolus, lateral condyl, greater trochanter, greater tubercle and ear.

Surface EMG electrodes (5mm contact surface; 27x37x15 mm) recorded muscle activity at 1000 Hz. Electrode placement was determined following SENIAM recommendations (Hermens et al., 2000). Large elastic nets were used to hold the electrodes on the skin

and prevent them from moving or falling. Pre-amplified electrical signals were transmitted to an integrated amplifier (bandwidth = 20-450 Hz, CMRR =  $20\pm 5$  Hz,  $>40$  dB/dec, amplification = 1000X). Accelerometry measurements were recorded using accelerometers integrated within the same EMG wireless electrodes placed on lower body muscles. Accelerometer sensibility was set at 1.5g (bandwidth = DC -  $50\pm 5$  Hz, 20 dB/dec, acquisition frequency = 148.1/sec).

### **Exercise protocol**

The full protocol was on four separate days during which the participants performed twice a “control” test (CON) and a “pre-activation” test (EXP) detailed below. Tests were at least 7 days apart and randomly assigned. Subjects were instructed to maintain regular individual and team training sessions between tests. After a dynamic warm-up of 2-min (including stationary jogging, high-knees, karaoke shuffles and half-squats), subjects performed 5 consecutive maximal squat jumps for peak power reference value, preceded by a 1-min rest and followed by 5-min rest. The CON test lasted ~12 minutes and consisted in 2 sets of 9 blocks of 6 maximal squat jumps with a 5-sec isometric squat between blocks and a 5-min rest between sets. During maximal jump squats, participants were asked to keep their hands on hips. During isometric squats, they were asked to maintain trunk angle at  $45^\circ$  and knee angle at  $90^\circ$ .

The EXP test lasted ~19 minutes and was identical to CON, except that it involved of a lower body pre-activation 5-min before the first set of maximal squat jumps. Pre-activation consisted in a single leg maximal isometric back squat exercise against a fixed bar and intended to target hip stabilizers and leg extensors and flexors. Isometric

contractions were performed successively twice for right and left leg for 3-s each and therefore resulted in an overall 6-s bilateral pre-activation.

### **Data Processing**

All processing was done in Matlab 2012b (version 7.7.0.471; Mathworks, Natick, MA, USA). EMG data were synchronized manually with accelerometer data (X axis) in order to outline each squat cycle. Matlab EMG observation number was associated with acceleration peak to define each squat. For each jump, power output was obtained from TENDO Power and Speed Analyzer unit after having entered the proper mass of the athlete into the microcomputer. For each block, mean power output (MPO) was obtained by averaging power output over the 6 corresponding jumps. Raw EMG signal was 1) zero-lag 4th order bandpass filter 10-400 Hz, 2) full-wave rectified by taking absolute value. In both concentric and eccentric phases of each jump, 1) frequency analysis = 1.1) FFT then 1.2) calculation of the mean frequency, 2) quantification of EMG activity = 2.1) zero-lag 4th order lowpass filter 9 Hz (Shiavi, Frigo, and Pedotti, 1998), 2.2) RMS. Sagittal 2D coordinates of body markers were first determined from the video sequences using AviMéca free software (v. 2.7.30, <http://alain.legall2.pagesperso-orange.fr/avimeca/avimeca.htm>). Trajectories of markers were then smoothed using a Butterworth filter with cut-off frequency at 6 Hz, and finally used as input data for the calculation of ankle, knee and hip joint angles. Angle range quantification of the ankle, knee and hip was then performed using a low-pass filter and spline interpolation. Angular velocity was obtained by an analytic derivative of the angles and low-pass filtered at 6 Hz. The same procedure was applied to obtain angular acceleration values.



All mentioned filters were fourth-order zero-lag Butterworth. Squats were normalized on 100 points in order to compare them.

## **Statistics**

Only block one and nine (first and last) for each set were included in the statistical analyses. For all participants and each conditions, first and last blocks mean values of all trials were obtained. Three factor (condition [CON or EXP], set and block) ANOVAs for repeated measures were conducted on power output, RMS, mean frequency, angular acceleration and angular velocity, using STATISTICA (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA). Subsequent post-hoc comparisons were carried out using the Scheffé test. Level of significance was set at  $\alpha = 0.05$ . Standardized mean difference with Cohen's  $f$  effect size was calculated for main effects and Cohen's  $d$  effect size for difference between conditions as ANOVAs for repeated measures were performed (ES). Statistical power ( $pu$ ) was also obtained for given sample.

## **RESULTS**

### **Mean power output**

Mean power output showed a significant *Block* effect ( $F_{1,4} = 9.98$ ;  $p < 0.05$ ;  $\varepsilon = 1$ ;  $\eta^2 p = 0.78$ ; Cohen's  $f = 1.88$ ;  $pu = 0.92$ ); the mean power output was lower in block 9 than in block 1 (Figure 1). Blocks power output was significantly decreased ( $p \leq 0.00$ ) between first and last blocks by 18.9% and 21.3% for CON condition ( $956.6 \pm 271W$  to  $804.5 \pm 196.6W$ ;  $953.5 \pm 249.2W$  to  $786.1 \pm 129.8W$ ) and 26.4% and 22.5% for EXP condition

(1004 ± 258.2W to 794.1 ± 209.5W; 1009.7 ± 272.4W to 824.5 ± 172.9W). Changes in power output are shown in Fig. 1

- Insert Figure 1 here -

### **EMG mean frequency**

There was a *block* main effect for right VM, Gmax, Gmed, GM and left VM, RF, and GMed, and more significantly for right RF ( $F_{1,4} = 25.59$ ;  $p < 0.007$ ;  $\epsilon = 1$ ;  $\eta^2 p = 0.81$ ; Cohen's  $f = 2.52$ ;  $p_u = 0.96$ ), left Gmax ( $F_{1,4} = 51.86$ ;  $p < 0.002$ ;  $\epsilon = 1$ ;  $\eta^2 p = 0.93$ ; Cohen's  $f = 3.64$ ;  $p_u = 0.9995$ ) and left GM ( $F_{1,4} = 70.94$ ;  $p < 0.001$ ;  $\epsilon = 1$ ;  $\eta^2 p = 0.94$ ; Cohen's  $f = 3.96$ ;  $p_u = 0.9999$ ; Figure 2) (all results are shown in appendix 1).

Left TA mean frequency was significantly different from CON ( $F_{1,4} = 16.75$ ;  $p < 0.015$ ;  $\epsilon = 1$ ;  $\eta^2 p = 0.81$ ; Cohen's  $d = 2.59$ ;  $p_u = 0.86$ ); the EMG frequency was higher in EXP than in CON (figure 2). Left Gmax mean frequency showed a significantly different *Block* effect in EXP ( $F_{1,4} = 8.91$ ;  $p < 0.041$ ;  $\epsilon = 1$ ;  $\eta^2 p = 0.69$ ; Cohen's  $d = 1.88$ ;  $p_u = 0.61$ ), as the EMG frequencies were higher in EXP than in CON (figure 2).

- Insert Figure 2 here -

- Insert Figure 3 here -

### **EMG amplitude**

Right GM EMG amplitude showed a significant *Block* effect ( $F_{1,4} = 16.95$ ;  $p < 0.01$ ;  $\epsilon = 1$ ;  $\eta^2 p = 0.81$ ;  $f$  ES = 2.065;  $p_u = 0.86$ ); the EMG amplitude was lower in block 9 than in

block 1 (Figure 4). Blocks EMG amplitude was significantly decreased ( $p < 0.015$ ) between first and last blocks by 15% and 18% for CON condition ( $5.19E-05 \pm 1.93E-05V$  to  $4.51E-05 \pm 1.82E-05V$ ;  $5.25E-05 \pm 1.82E-05V$  to  $4.44E-05 \pm 1.31E-05V$ ) and 26% and 1% ( $5.95E-05 \pm 1.54E-05V$  to  $4.71E-05 \pm 1.26E-05V$ ;  $5.19E-05 \pm 1.25E-05V$  to  $5.17E-05 \pm 1.49E-05V$ ) for EXP condition. Left TA EMG amplitude showed a significant *block* effect ( $F_{1,4} = 9.84$ ;  $p < 0.05$ ;  $\epsilon = 1$ ;  $\eta^2 p = 0.71$ ;  $f ES = 1.56$ ;  $pu = 0.66$ ); the EMG amplitude was lower in block 9 than in block 1 (Figure 5). EMG amplitude was significantly decreased ( $p < 0.034$ ) between first and last blocks by 24% and 32% for CON condition ( $5.37E-05 \pm 2.06E-05V$  to  $4.34E-05 \pm 1.60E-05V$ ;  $6.43E-05 \pm 3.52E-05V$  to  $4.85E-05 \pm 2.16E-05V$ ) and 13% and 17% ( $5.76E-05 \pm 1.88E-05V$  to  $5.11E-05 \pm 2.01E-05V$ ;  $5.41E-05 \pm 1.76E-05V$  to  $4.61E-05 \pm 1.78E-05V$ ) for EXP condition. No significant difference were recorded for the other muscles.

- Insert Figure 4 here -

- Insert Figure 5 here -

### **Angular velocity and acceleration**

Hip angular velocity showed a significant interaction between first and second set in EXP condition ( $F_{1,4} = 173.61$ ;  $p < 0.001$ ;  $\epsilon = 1$ ;  $\eta^2 p = 0.98$ ;  $d ES = 8.33$ ;  $pu = 1$ ); the hip angular velocity was decreased between first blocks in EXP but not in CON and increased for second blocks in EXP only (Figure 6). Angular velocity at the hip showed an interaction between sets and EXP condition ( $p \leq 0.00$ ) as it decreased between first blocks ( $402.02 \pm 59.75 \text{ deg.s}^{-1}$  to  $356.68 \pm 46.95 \text{ deg.s}^{-1}$ ) and increased between second blocks ( $369.62 \pm 49.10 \text{ deg.s}^{-1}$ ;  $388.62 \pm 56.49 \text{ deg.s}^{-1}$ ) of each set. Angular

velocity also increased during the second set ( $356.68 \pm 46.95 \text{ deg.s}^{-1}$  to  $388.62 \pm 56.49 \text{ deg.s}^{-1}$ ). There were no significant differences in knee joint kinematics.

Ankle angular acceleration showed a significant effect between blocks ( $F_{1,4} = 10.44$ ;  $p < 0.05$ ;  $\varepsilon = 1$ ;  $\eta^2 p = 0.78$ ;  $ES = 0.88$ ;  $p_u = 0.59$ ); the ankle angular acceleration was lower in block 9 than in block 1 (Figure 7). Angular acceleration of the ankle was significantly decreased ( $p \leq 0.05$ ) between the first block and last block (4% and 16% respectively) for the CON condition ( $5287.06 \pm 131.16 \text{ deg.s}^{-2}$  to  $5075.32 \pm 528.71 \text{ deg.s}^{-2}$ ;  $5461.35 \pm 426.86 \text{ deg.s}^{-2}$  to  $4706.16 \pm 830.02 \text{ deg.s}^{-2}$ ) and 13% and 22% for the EXP condition ( $5484.33 \pm 768.12 \text{ deg.s}^{-2}$  to  $4858.32 \pm 779.94 \text{ deg.s}^{-2}$ ;  $6031.11 \pm 288.88 \text{ deg.s}^{-2}$  to  $4946.82 \pm 604.5 \text{ deg.s}^{-2}$ ).

- Insert Figure 6 here -

- Insert Figure 7 here -

## **DISCUSSION**

At this time, equivocal results in the literature cannot confirm whether pre-activation strategies can trigger PAP, or not, to improve subsequent performance (Hodgson et al., 2005). The present study has investigated the impact of a lower-body pre-activation on coordination patterns of the main muscle groups involved in squat jumps. Results have shown no difference in performance with pre-activation, with an expected decrease in power output, mean frequency, angular acceleration and velocity (only in EXP), suggesting a fatigued state. EMG showed a decrease in RMS for 2 muscles but no change for the 5 others which would be indicative of an overall fatigued state for both

conditions. Mean frequency values showed a reduced expression of fatigue for left Gmax and TA in EXP, although an overall decrease during blocks for other muscles. Present results from this study indicate that a low-body isometric pre-activation does not increase subsequent repeated jump performance. However, results have shown a change in the coordination of the lower body muscles which could lead to a different state of fatigue at the end of exercise after pre-activation. This could hypothetically be due to compensations for left and right leg asymmetries in the production of force.

Mean power output decreased similarly between the first and last block in control and experimental conditions. These results show that the pre-activation did not trigger a potentiation effect, neither during the first block of jumps, nor on the overall exercise protocol. The fast-twitch muscle fibers are highly solicited during explosive movements and can achieve a high level of fatigue, which could explain the observed decrease in power output (Karatzaferi et al., 2001). Our results support those of Esformes et al., (Esformes et al., 2011), Khamoui et al., (Khamoui et al., 2009) and others (Folland et al., 2008; Parry et al., 2008; Robbins and Docherty, 2005) who found that pre-activation does not always trigger PAP. To our knowledge, only one study has investigated the effect of gluteal muscle group pre-activation on explosive power (Buttifiant et al., 2011). They showed that when compared with a control condition without activation, a submaximal pre-activation protocol induced a greater peak power for 5 subsequent countermovement jumps. The lower intensity of the pre-activation contractions and the greater duration for which they were applied (7 min) could explain the differences observed with our study. Miyamoto et al. (Miyamoto and Kanehisa, 2012) reported that 5 or 6 seconds maximal pre-activation contractions may be enough to trigger PAP.

Although our protocol included two 3-s isometric contractions performed on each leg with 4-5 s of rest in between leading to a total of 6 seconds per leg, no potentiation effect was observed. Hence, contraction duration for each single-limb squat might have been too short to trigger PAP and potentiate power output even though the total pre-activation duration was 6-s per leg. In addition, even though single-limb isometric squats significantly recruit GMax and GMed (Reiman et al., 2012), a more targeted exercise, such as loaded hip abductions, would prevent compensating strategies during complex multi-joint exercises and could be more relevant to trigger PAP (McBeth et al., 2012). In accordance with our results, a study conducted by Duthie et al. (Duthie et al., 2002) demonstrated that a pre-activation of heavy 3RM squats did not have an impact on loaded jump squat power output over consecutive sets. The protocol also involved 5 squat jumps that were performed at the end of the warm-up prior to pre-activation and which may have triggered PAP too early, explaining the null result (Duthie et al., 2002). These findings confirm that pre-activation modalities can have an impact on PAP (Hodgson et al., 2005; Sale, 2002; Tillin and Bishop, 2009) if managed appropriately. Based on these results and with the aim of triggering PAP, it would be recommended to use a pre-activation contraction that is not shorter than 6 s and to allow a recovery time that prevents fatigue in a case where a warm-up or a maximal test needs to be performed prior to the main exercise.

Firing mean frequency of the hip stabilizers was not different with pre-activation condition except for left Gmax, for which the mean frequency was shown to be higher in first PRE set but tended to be similar to CON's second set. Typically, decrease in EMG mean frequencies has been shown to be related to fatigue, suggesting that a subject's

capacity to generate maximal neural drive to muscles is altered (Cifrek et al., 2009; Garrandes et al., 2007; Babault, et al., 2006; Bonato et al., 2001; Kent-Braun, 1999; Vollestad et al., 1997, Bigland-Ritchie et al., 1983). It is then important to identify training strategies that could lead in a delayed fatigue apparition. Our results suggest that pre-activation may have an impact on Gmax's fatigue, since it was less fatigued after potentiation during the first block, regardless to the sets. This result suggests that pre-activation delayed the appearance of fatigue of left hip stabilizers although it did not change the overall power performance. Interestingly, significant changes were specific to the left leg. Although the small number of subjects, the effect size for Gmax (1.88) would suggest an actual higher mean frequency in the EXP condition and therefore, that the effect would be fairly large in our data. In fact, the given effect size suggests that the left Gmax in EXP condition is 1.88 standard deviations higher than in the control condition. In other words, there is a significant impact of pre-activation on fatigue that needs to be taken in consideration although  $p$  value ( $p < 0.041$ ) could lead us to think that the effect is near non-significant. The presence of leg dominance differences at the hip and knee in athletes have been reported during a in a jump task protocol (Calmels et al., 1997). In long-track speed skating, while skating through turns, Koning et al. (de Koning, de Groot, and van Ingen Schenau, 1991b) showed that there was a highly asymmetrical movement pattern of the legs, as push-off forces are mainly directed to the left leg. Even though both legs kinematics resembles, speed skaters do show an lower-body asymmetry, also demonstrated by Hesford et al. (Hesford et al., 2012). It is then considered that right leg would be stronger then the left leg, as it would have more of a power-producing role than stabilization. Thus, the need for the left leg to be able to stabilize and support generated force is crucial. In addition, there would be hip abduction

strength differences between dominant and nondominant legs, as seen with Jacobs et al. (Jacobs et al., 2005). Therefore, the response to the presented protocol on both right and left legs may demonstrate that there was a difference in hip complex strength and that pre-activation may have had a greater impact on the most stabilizing and weaker leg. Strength imbalance occurring in athletes have been shown to have an impact in performance and in increased injury rates, as demonstrated by Newton et al. (Newton et al., 2006). Therefore, short-track skaters registering a high level of injury (Engebretsen et al., 2010) could be due to strength imbalance between left and right hip muscles (Newton et al., 2006). Since asymmetry of the lower body causes lower-body injury, low-back pain, reduced hip muscle strength (Nadler et al., 2000), and that hip dysfunction causes low back and knee injury (Dwyer et al., 2010; Kibler et al., 2006; Powers, 2010), it is of interest to consider the effect of pre-activation on non-dominant leg. Even though this finding was not related to an increase of performance, it could lead to intervention on muscle imbalance and recognized asymmetry in speed skaters, in order to prevent the injury risk.

Mean frequency remained unchanged for left and right BF and right TA but decreased for all left and right muscles for CON and EXP between the first and last block. Decreases in mean frequencies suggested that subjects' capacity to generate maximal neural drive to muscles was altered due to fatigue (Babault et al., 2006; Vollestad:1997ft Bigland-Ritchie et al., 1983; Kent-Braun, 1999). In response to a maximal exercise, fast-twitch fibers fatigue first and consequently, slow-twitch fibers and synergistic muscles take over to command subsequent power output, decreasing mean frequency (Dingwell et al., 2008; Moritani and Muro, 1987). Thus, since motor units composed of slow fibers



produce less strength than fast-twitches, this result is consistent with the decrease of power output. Left and right BF, which are knee flexor and participates to hip stabilization, recorded no changes in mean frequency values. These results could suggest that BF may have used strategies during the repeated jumps in order to control the apparition of fatigue. Again, effect size value (1.47) leads us to think that there is an actual significant. On the other hand, VM, extensor to the knee, recorded a decrease in mean frequency values as block effect. As for the right TA, given the fact that it is not a primary motor muscle in this kind of task, it seems reasonable that it does not fatigue. However, it does fatigue faster between sets in EXP, which may lead us to believe the left leg would be weaker although mean frequencies were higher for the first block of each set. With fatigue, ankle-dominant strategies are put into place, relying less on the knee musculature (Padua et al., 2006). Altogether, the decrease in EMG mean frequencies serving as an index of fatigue, along with power output values confirmed the state of fatigue of the subjects. The unchanged values for both BF and right TA along with the differences with EXP for left TA and Gmax showed the influence of pre-activation on the non-dominant leg in response to fatigue.

EMG amplitude RMS decreased for right GM and left TA between the first and last block and remained unchanged throughout the fatiguing task for all other muscles. Unchanged EMG amplitude along with a decrease in power output agree with previous findings (Billaut et al., 2005). An absence of RMS alteration with fatigue could suggest an absence of segmental movement coordination due to a strong preprogrammed movement pattern (Rodacki et al., 2001). Though hip stabilizers muscles are fatigued, this mechanism helps to maintain a steady activation level of agonist and antagonist

muscles. The stability may thus not be altered with fatigue which may protect the hip joint from injury throughout the experiment.

Given fatigue can decrease EMG amplitude signals (Dimitrova and Dimitrov, 2003; Mendez-Villanueva et al., 2008; Moritani and Muro, 1987; Thomas, et al., 2006), the observed decrease of EMG amplitude of right GM and left TA muscles may be interpreted as a physiological response to fatigue. Motor units with the highest initial frequencies are to change their firing rate more rapidly because of the inability to sustain a high intensity demand (Bigland-Ritchie et al., 1983). However, the alteration in EMG amplitude could also be interpreted in terms of intermuscular coordination adjustments (Psek and Cafarelli, 1993). Indeed, it has already been mentioned that the neural drive may be reduced in order to protect the musculoskeletal system from injury since there is a too important difference between activation of agonist versus antagonist output (Westing et al., 1991). The decrease of right GM and left TA may thus be interpreted as intermuscular adjustments (Jaric, 2000). Right leg muscles would be stronger in short track speed skaters (de Koning et al., 1991a; de Koning et al., 1991b). On this matter, right ankle flexor would need to decrease its activation, and thereby right ankle power output, in order to adjust to the more fatigued left ankle muscles to prevent from left-right imbalance (Amann and Dempsey, 2007; Rodacki et al., 2001). On the other hand, the left TA activation level may be reduced to maintain constant power output at the ankle due to left GM fatigue. However, the decrease of antagonist coactivation being associated to a decreased joint stability, this adaptation occurs at the expense of joint safety (Kellis, 1998; Moorhouse and Granata, 2007; Van Dieën et al., 2011). Altogether, right GM and left TA EMG amplitude alterations would evidence that athletes are weaker on the left side and that strategies of motor coordination occurs in response to fatigue

(Billaut et al., 2005) to maintain a maximum force production around the joint (Padua et al., 2006).

The decrease in hip angular velocity with pre-activation and the ankle angular acceleration block main effect also support the overall fatigue state. Fatigue is associated with changes in lower-body joint kinematics (Dingwell et al., 2008; Mizrahi et al., 2000). The ankle acceleration decrease may be supported by the intermuscular reorganization pattern in ankle flexors and extensors. Therefore, coordination patterns are altered in reaction of the changes in muscles electrophysiological properties and in motor drive. The difference between CON and EXP and between sets in hip flexion angular velocity may be related to the Gmax less fatigued state with pre-activation, as the angular velocity is higher for the first block of each set. The decrease in joint kinematics may also be explained by the attempt to increase joint stabilization (Benjaminse et al., 2007) as well as the inability to produce enough power to maintain velocity and acceleration. These results show the modifications towards inefficient intermuscular coordination in response to a fatiguing exercise.

## **PRACTICAL APPLICATIONS**

The results showed in the present study could guide coaches and clinicians to optimize training involving stability of the hip complex while attempting to perform in activities involving power. As seen in the current study with short-track speed skaters, pre-activation of the non-dominant leg could be a strategy used to reduce asymmetry with the implication of recruitment patterns modifications. Lower-body pre-activation could

then be used in order to delay the expression of fatigue, consequently lowering the risk of injury due to its effects on muscle coordination and coactivation.

## **CONCLUSION**

In conclusion, lower-body maximal isometric pre-activation did not improve significantly repetitive jump performance in athletes, neither hip stabilizers' coordination. Therefore, with the aim of triggering PAP, it would be recommended to use a pre-activation contraction that is not shorter than 6 seconds and allow a recovery time that prevents prior fatigue to impact the performance, in a case where a warm-up or a maximal test need to be performed. Although no increase in power output was recorded, which was hypothesized to be possibly due to an increase in hip complex muscles coordination, mean frequency and RMS values demonstrated other compensation strategies in lower body in order to respond to the high demand of the repeated jump task. Hip stabilizers' pre-activation neither seemed to have had an impact on squatting recruitment patterns, as power output, RMS and mean frequency were not different from each conditions and hip angular velocity and ankle acceleration were decreased. However, pre-activation did delay fatigue in left hip stabilizers, which is even more interesting due to its role in power development. This finding along with the modifications in recruitment patterns in left TA an GM with pre-activation is even more interesting knowing that the left leg is not dominant in speed skating.

A limit needs to be addressed, however, as our interpretation of results does not take the peripheral component of EMG signal interpretation into consideration. Indeed, in

addition to modifications in EMG activity that can be due to a reduction or increase in neural drive to the muscles, a change in the neuromuscular transmission (sarcolemmal excitability, action potentials conduction on post-synaptic membrane - M-Wave amplitude) (Perrey et al., 2010) also plays a role in EMG signal dynamics. On the other hand, in order to support our present results and relate potential effects of PAP to modifications on recruitment strategies, neuromuscular efficiency (NME) (work/EMG) could be calculated. The integration of this information would allow us to expose perturbations of muscle contractility (Bigland-Ritchie et al., 1981) and therefore, to specify the implication of neuromuscular activity peripheral components to our results (Perrey et al., 2010).

Although great care needs to be applied due to the low number of subjects in this study and the limits before mentioned, our results could lead us to think that pre-activation may have had more impact on a the lower-body side more involved in stabilization than in power production in the speed skater athlete. Indeed, short-track skaters are registering a high level of injury (Engebretsen et al., 2010), possibly due to strength imbalance between left and right leg (Newton et al., 2006). Since asymmetry of the lower body is related to lower-limb and low-back injury (Nadler et al., 2000) and that hip dysfunction also causes low back and knee injury (Dwyer et al., 2010; Kibler et al., 2006; Powers, 2010), it would be of interest, in further research, to consider the effect of pre-activation on non-dominant leg.

## References

- Amann, M., and Dempsey, J. A. (2007). Locomotor muscle fatigue modifies central motor drive in healthy humans and imposes a limitation to exercise performance. *J Physiol*, 586(1), 161–173. doi:10.1113/jphysiol.2007.141838
- Babault, N., Desbrosses, K., Fabre, M.-S., Michaut, A., and Pousson, M. (2006). Neuromuscular fatigue development during maximal concentric and isometric knee extensions. *J Appl Physiol*, 100(3), 780–785. doi:10.1152/jappphysiol.00737.2005
- Baratta, R., Solomonow, M., Zhou, B. H., Letson, D., Chuinard, R., and D'Ambrosia, R. (1988). Muscular coactivation: The role of the antagonist musculature in maintaining knee stability. *Am J Sports Med*, 16(2), 113–122. doi:10.1177/036354658801600205
- Barton, C. (2013). Gluteal muscle activity and patellofemoral pain syndrome: a systematic review. *Br J Sports Med*, 47:207–214. doi:10.1136/bjsports-2012-090953
- Batista, M. A. B., Roschel, H., Barroso, R., Ugrinowitsch, C., and Tricoli, V. (2011). Influence of Strength Training Background on Postactivation Potentiation Response. *J Strength Cond Res*, 25(9), 2496.
- Baudry, S., and Duchateau, J. (2006). Postactivation potentiation in a human muscle: effect on the rate of torque development of tetanic and voluntary isometric contractions. *J Appl Physiol*, 102(4), 1394–1401. doi:10.1152/jappphysiol.01254.2006

- Benjaminse, A., Habu, A., Sell, T. C., Abt, J. P., Fu, F. H., Myers, J. B., and Lephart, S. M. (2007). Fatigue alters lower extremity kinematics during a single-leg stop-jump task. *Knee Surg Sport Tr A*, 16(4), 400–407. doi:10.1007/s00167-007-0432-7
- Bigland-Ritchie, B., Donovan, E. F., & Roussos, C. S. (1981). Conduction velocity and EMG power spectrum changes in fatigue of sustained maximal efforts. *J Appl Physiol*, 51:1300-1305
- Bigland-Ritchie, B., Johansson, R., Lippold, O. C., Smith, S., and Woods, J. J. (1983). Changes in motoneurone firing rates during sustained maximal voluntary contractions. *J Physiol*, 340, 335-346
- Billaut, F., Basset, F. A., and Falgairette, G. (2005). Muscle coordination changes during intermittent cycling sprints. *Neurosci Lett*, 380(3), 265–269. doi:10.1016/j.neulet.2005.01.048
- Binder-Macleod, S., and Kesar, T. (2005). Catchlike property of skeletal muscle: Recent findings and clinical implications. *Muscle and nerve*, 31(6), 681–693. doi:10.1002/mus.20290
- Bonato, P., Heng, M., Gonzalez-Cueto, J., Leardini, A., O'Connor, J., and Roy, S. H. (2001). EMG-based measures of fatigue during a repetitive squat exercise. *IEEE, Eng Med Biol Mag*, 20(6), 133–143.
- Boudreau, S. N., Dwyer, M. K., Mattacola, C. G., Lattermann, C., Uhl, T. L., and McKeon, J. M. (2009). Hip-muscle activation during the lunge, single-leg squat, and step-up-and-over exercises. *J Sport Rehabil*, 18(1), 1–14.
- Buttifiant, D., Crow, J., Kearney, S., and Hrysomallis, C. (2011). Whole Body Vibration vs. Gluteal Muscle Activation: What are the Acute Effects on Explosive Power? *J Strength Cond Res*, 25, S14.

- Calmels, P. M., Nellen, M., van der Borne, I., Jourdin, P., and Minaire, P. (1997). Concentric and eccentric isokinetic assessment of flexor extensor torque ratios at the hip, knee, and ankle in a sample population of healthy subjects. *Arch Phys Med Rehab*, 78(11), 1224–1230.
- Cambridge, E. D. J., Nathalie Sidorkewicz, and McGill, S. M. (2012). Hip and Spine Motion During Progressive Hip Rehabilitation Implications for the Low Back Pain Patient. *Canadian Journal of Kinesiology*, 6, 13–14)
- Carregaro, R. L., Gentil, P., Brown, L. E., Pinto, R. S., and Bottaro, M. (2011). Effects of antagonist pre-load on knee extensor isokinetic muscle performance. *J Sport Sci*, 29(3), 271–278. doi:10.1080/02640414.2010.529455
- Chiu, L. Z. F., Fry, A. C., Schilling, B. K., Johnson, E. J., and Weiss, L. W. (2004). Neuromuscular fatigue and potentiation following two successive high intensity resistance exercise sessions. *Eur J Sports Med*, 92(4-5). doi:10.1007/s00421-004-1144-z
- Chiu, L. Z. F., Fry, A. C., Weiss, L. W., Schilling, B. K., Brown, L. E., and Smith, S. L. (2003). Postactivation Potentiation Response in Athletic and Recreationally Trained Individuals. *J Strength Cond Res*, 17(4), 671.
- Cifrek, M., Medved, V., Tonković, S., and Ostojić, S. (2009). Surface EMG based muscle fatigue evaluation in biomechanics. *Clin Biomech*, 24(4), 327–340. doi:10.1016/j.clinbiomech.2009.01.010
- Comyns, T. M., HARRISON, A. J., HENNESSY, L., and Jensen, R. L. (2007). Identifying the optimal resistive load for complex training in male rugby players. *J Sports Biomech*, 6(1), 59–70. doi:10.1080/14763140601058540



- Crow, J. F., Buttifant, D., Kearny, S. G., and Hrysomallis, C. (2012). Low Load Exercises Targeting the Gluteal Muscle Group Acutely Enhance Explosive Power Output in Elite Athletes. *J Strength Cond Res*, 26(2), 438.
- de Koning, J. J., de Groot, G., and Ingen Schenau, G. J. V. (1991a). Coordination of leg muscles during speed skating. *J Biomech*, 24(2), 137–146. doi:10.1016/0021-9290(91)90358-T
- de Koning, J. J., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1991b). Speed Skating the Curves: A Study of Muscle Coordination and Power Production. *Ibt J Sports Biomech*, 7, 344–358.
- De Ruiter, C. J., Van Leeuwen, D., Heijblom, A., Bobbert, M. F., and De Hann, A. (2006). Fast unilateral isometric knee extension torque development and bilateral jump height. *Med Sci Sport Exercise*, 38(10), 1843–1852. doi:10.1249/01.mss.0000227644.14102.50
- Dimitrova, N. A., and Dimitrov, G. V. (2003). Interpretation of EMG changes with fatigue: facts, pitfalls, and fallacies. *J Electromyogr Kines*, 13(1), 13–36. doi:10.1016/S1050-6411(02)00083-4
- Dingwell, J. B., Joubert, J. E., Diefenthaler, F., and Trinity, J. D. (2008). Changes in Muscle Activity and Kinematics of Highly Trained Cyclists During Fatigue. *IEEE, Eng Med Biol Mag*, 55(11), 2666–2674. doi:10.1109/TBME.2008.2001130
- Docherty, D., and Hodgson, M. J. (2007). The application of postactivation potentiation to elite sport. *Int J Sports Physiol Perform*, 2(4), 439.
- Duthie, G. M., Young, W. B., and Aitken, D. A. (2002). The acute effects of heavy loads on jump squat performance: An evaluation of the complex and contrast methods of power development. *J Strength Cond Res*, 16(4), 530–538.

- Dwyer, M. K., Boudreau, S. N., Mattacola, C. G., Uhl, T. L., and Lattermann, C. (2010). Comparison of lower extremity kinematics and hip muscle activation during rehabilitation tasks between sexes. *J Athl Train*, 45(2), 181.
- Ebben, W. P., Jensen, R. L., and Blackard, D. O. (2000). Electromyographic and kinetic analysis of complex training variables. *J Strength Cond Res*, 14(4), 451–456.
- Engebretsen, L., Steffen, K., Alonso, J. M., Aubry, M., Dvorak, J., Junge, A., et al. (2010). Sports injuries and illnesses during the Winter Olympic Games 2010. *Br J Sports Med*, 44(11), 772–780. doi:10.1136/bjism.2010.076992
- Esformes, J. I., Keenan, M., Moody, J., and Bampouras, T. M. (2011). Effect of different types of conditioning contraction on upper body postactivation potentiation. *J Strength Cond Res*, 25(1), 143.
- Folland, J. P., Wakamatsu, T., and Fimland, M. S. (2008). The influence of maximal isometric activity on twitch and H-reflex potentiation, and quadriceps femoris performance. *Eur J Appl Physiol*, (104), 739–748.
- French, D. N., Kraemer, W. J., and Cooke, C. B. (2003). Changes in dynamic exercise performance following a sequence of preconditioning isometric muscle actions. *J Strength Cond Res*, 17(4), 678.
- Frigon, A., Thompson, C. K., Johnson, M. D., Manuel, M., Hornby, T. G., and Heckman, C. J. (2011). Extra forces evoked during electrical stimulation of the muscle or its nerve are generated and modulated by a length-dependent intrinsic property of muscle in humans and cats. *J Neurosci*, 31(15), 5579–5588.
- Gabriel, D. A., Kamen, G., and Frost, G. (2006). Neural adaptations to resistive exercise. *Sports Med*, 36(2), 133–149. doi:10.2165/00007256-200636020-00004

- Garrandes, F., Colson, S. S., Pensini, M., Seynnes, O., and Legros, P. (2007). Neuromuscular Fatigue Profile in Endurance-Trained and Power-Trained Athletes. *Med Sci Sport Exercise*, 39(1), 149–158. doi:10.1249/01.mss.0000240322.00782.c9
- Gossen, E. R., and Sale, D. G. (2000). Effect of postactivation potentiation on dynamic knee extension performance - Springer. *Eur J Appl Physiol*, (83), 524–530.
- Güllich, A., and Schmidtbleicher, D. (1996). MVC-induced short-term potentiation of explosive force. *New Stud Athlet*, 67–81.
- Hanson, E. D., Leigh, S., and Mynark, R. G. (2007). Acute effects of heavy-and light-load squat exercise on the kinetic measures of vertical jumping. *J Strength Cond Res*, 21(4), 1012.
- Hermens, H. J., Freriks, B., Disselhorst-Klug, C., and Rau, G. (2000). Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *J of Electromyogr Kines*, 10(5), 361–374.
- Hesford, C., Laing, S. J., Cardinale, M., and Cooper, C. E. (2012). Asymmetry of Quadriceps Muscle Oxygenation during Elite Short-Track Speed Skating. *Med Sci Sport Exercise*, 44(3), 501. doi:10.1249/MSS.0b013e31822f8942
- Hodgson, M., Docherty, D., and Robbins, D. (2005). Post-activation potentiation: underlying physiology and implications for motor performance. *Sports Med*, 35(7), 585–595.
- Izquierdo, M., Häkkinen, K., and Gonzalez-Badillo, J. J. (2002). Effects of long-term training specificity on maximal strength and power of the upper and lower extremities in athletes from different sports. *Eur J Appl Physiol*, (87), 264–271.

- Jacobs, C., Uhl, T. L., Seeley, M., Sterling, W., and Goodrich, L. (2005). Strength and fatigability of the dominant and nondominant hip abductors. *J Athl Train*, 40(3), 203.
- Jaric, S. (2000). Changes in movement symmetry associated with strengthening and fatigue of agonist and antagonist muscles. *J Motor Behav*, 32(1), 9–15.
- Karatzafieri, C., De Haan, A., van Mechelen, W., and Sargeant, A. J. (2001). Metabolic changes in single human muscle fibres during brief maximal exercise. *Exp Physiol*, 86(3), 411–415. doi:10.1113/eph8602223
- Kellis, E. (1998). Quantification of quadriceps and hamstring antagonist activity. *Sports Med*, 25(1), 37–62.
- Kellis, E., and Kouvelioti, V. (2009). Agonist versus antagonist muscle fatigue effects on thigh muscle activity and vertical ground reaction during drop landing. *J Electromyogr Kines*, 19(1), 55–64. doi:10.1016/j.jelekin.2007.08.002
- Kent-Braun, J. A. (1999). Central and peripheral contributions to muscle fatigue in humans during sustained maximal effort. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 80(1), 57–63.
- Khamoui, A. V., Brown, L. E., Coburn, J. W., Judelson, D. A., Uribe, B. P., Nguyen, D., et al. (2009). Effect of potentiating exercise volume on vertical jump parameters in recreationally trained men. *J Strength Cond Res*, 23(5), 1465–1469.
- Kibler, W. B., Press, J., and Sciascia, A. (2006). The Role of Core Stability in Athletic Function - Springer. *Sports Med*, 36(3), 189–198.
- Mahlfeld, K., Franke, J. R., and Awiszus, F. (2004). Postcontraction changes of muscle architecture in human quadriceps muscle. *Muscle Nerve*, 29(4), 597–600. doi:10.1002/mus.20021

- McBeth, J. M., Earl-Boehm, J. E., Cobb, S. C., and Huddleston, W. E. (2012). Hip Muscle Activity During 3 Side-Lying Hip-Strengthening Exercises in Distance Runners. *J Athl Train*, 47(1), 15.
- Mendez-Villanueva, A., Hamer, P., and Bishop, D. (2008). Fatigue in repeated-sprint exercise is related to muscle power factors and reduced neuromuscular activity. *Eur J Appl Physiol*, 103(4), 411–419. doi:10.1007/s00421-008-0723-9
- Miyamoto, N., and Kanehisa, H. (2012). Potentiation of Maximal Voluntary Concentric Torque in Human Quadriceps Femoris. *Med Sci Sports Exerc*, 44(9), 1738–1746.
- Mizrahi, J., Verbitsky, O., Isakov, E., and Daily, D. (2000). Effect of fatigue on leg kinematics and impact acceleration in long distance running. *Hum Movement Sci*, 19(2), 139–151. doi:10.1016/S0167-9457(00)00013-0
- Moorhouse, K. M., and Granata, K. P. (2007). Role of reflex dynamics in spinal stability: Intrinsic muscle stiffness alone is insufficient for stability. *J Biomech*, 40(5), 1058–1065. doi:10.1016/j.jbiomech.2006.04.018
- Moritani, T., and Muro, M. (1987). Motor unit activity and surface electromyogram power spectrum during increasing force of contraction. *Eur J Appl Physiol*, 56(3), 260–265. doi:10.1007/BF00690890
- Nadler, S. F., Malanga, G. A., DePrince, M., Stitik, T. P., and Feinberg, J. H. (2000). The Relationship Between Lower Extremity Injury, Low Back Pain, and Hip Muscle Strength in Male and Female Collegiate Athletes. *Clin J Sport Med*, 10(2), 89.
- Newton, R. U., Gerber, A., Nimphius, S., Shim, J. K., Doan, B. K., Robertson, M., et al. (2006). Determination of Functional Strength Imbalance of the Lower Extremities. *J Strength Cond Res*, 20(4), 971.

- Padua, D., L Arnold, B., H Perrin, D., M Gansneder, B., R Carcia, C., and P Granata, K. (2006). Fatigue, Vertical Leg Stiffness, and Stiffness Control Strategies in Males and Females. *J Athl Train*, 3, 294–304.
- Perrey, S., Racinais, S., Saimouaa, K., & Girard, O. (2010). Neural and muscular adjustments following repeated running sprints. *Eur J Appl Physiol*, 109(6), 1027–1036. doi:10.1007/s00421-010-1445-3
- Parry, S., Hancock, S., Shiells, M., Passfield, L., Davies, B., and Baker, J. (2008). Physiological Effects of Two Different Postactivation Potentiation Training Loads on Power Profiles Generated During High Intensity Cycle Ergometer Exercise. *Res Sports Med*, 16(1), 56–67. doi:10.1080/15438620701878998
- Powers, C. M. (2010). The influence of abnormal hip mechanics on knee injury: a biomechanical perspective. *J Orthop Sports Phys Ther*, 40(2), 42–51.
- Psek, J.-A., and Cafarelli, E. (1993). Behavior of coactive muscles during fatigue. *J Appl Physiol*, 74(1), 170–175.
- Rahimi, R. (2007). The acute effects of heavy versus light-load squats on sprint performance. *Facta Univ Phys Educ Sport*, 5(2), 163–169.
- Rassier, D., and Macintosh, B. (2000). Coexistence of potentiation and fatigue in skeletal muscle. *Braz. J. Med. Biol. Res*, 33(5), 499–508.
- Reiman, M. P., Bolgla, L. A., and Loudon, J. K. (2012). A literature review of studies evaluating gluteus maximus and gluteus medius activation during rehabilitation exercises. *Physiother Theory Pract*, 28(4), 257–268. doi: 10.3109/09593985.2011.604981

- Rixon, K. P., Lamont, H. S., and Bemben, M. G. (2007). Influence of type of muscle contraction, gender, and lifting experience on postactivation potentiation performance. *J Strength Cond Res*, 21(2), 500.
- Robbins, D. W. (2005). Postactivation potentiation and its practical applicability. *J Strength Cond Res*, 19(2), 453–458.
- Robbins, D. W., and Docherty, D. (2005). Effect of loading on enhancement of power performance over three consecutive trials. *J Strength Cond Res*, 19(4), 898.
- Rodacki, A. L. F., Fowler, N. E., and Bennett, S. J. (2001). Multi-segment coordination: fatigue effects. *Med Sci Sports Exerc*, 33(7), 1157.
- Sale, D. G. (2002). Postactivation potentiation: role in human performance. *Exerc Sport Sci Rev*, 30(3), 138.
- Seitz, L. (2011). *Mechanisms Underpinning Postactivation Potentiation Following Voluntary Isokinetic Knee Extensions* (pp. 1–24). Western Australia: School of Exercise and Health Sciences.
- Shiavi, R., Frigo, C., and Pedotti, A. (1998). Electromyographic signals during gait: Criteria for envelope filtering and number of strides. *Med Biol Eng Comput*, 36(2), 171–178. doi:10.1007/BF02510739
- Thomas, C. K., Johansson, R. S., and Bigland-Ritchie, B. (2006). EMG Changes in Human Thenar Motor Units With Force Potentiation and Fatigue. *J Neurophysiol*, (95), 1522–1598.
- Tillin, N. A., and Bishop, D. (2009). Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Med*, 39(2), 147–166.

- Tsao, H., and Hodges, P. W. (2007). Immediate changes in feedforward postural adjustments following voluntary motor training. *Exp Brain Res*, 181(4), 537–546. doi:10.1007/s00221-007-0950-z
- Van Dieën, J. H., Luger, T., and Van Der Eb, J. (2011). Effects of fatigue on trunk stability in elite gymnasts. *Eur J Appl Physiol*, 1–7.
- Westing, S. H., Cresswell, A. G., and Thorstensson, A. (1991). Muscle activation during maximal voluntary eccentric and concentric knee extension. *Eur J Appl Physiol*, 62(2), 104–108. doi:10.1007/BF00626764
- Young, W. (1992). Neural activation and performance in power events. *Mod. Athl. Coach*, 30, 29–31.
- Young, W., Jenner, A., and Griffiths, K. (1998). Acute Enhancement of Power Performance From Heavy Load Squats. *J Strength Cond Res*, 12(2), 82.

### **Acknowledgments**

The authors would like to thank all participants for their efforts and the coaching staff for allowing the athletes to participate in the study.



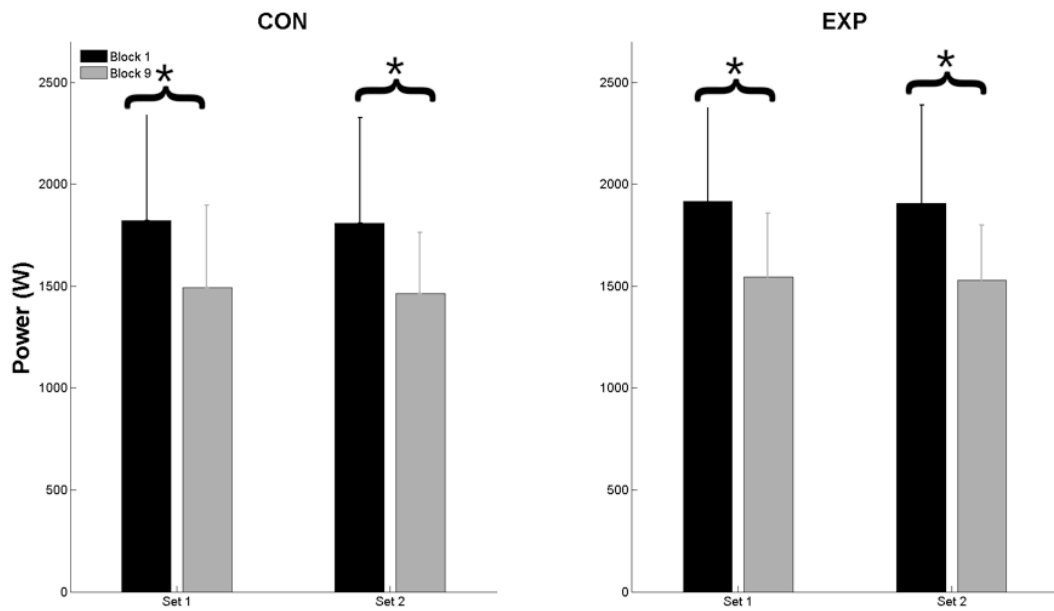


Figure 1. Power output (W) during repeated squat jump protocol in CON and EXP.

Values are the mean average power; \*  $p \leq 0.05$ .

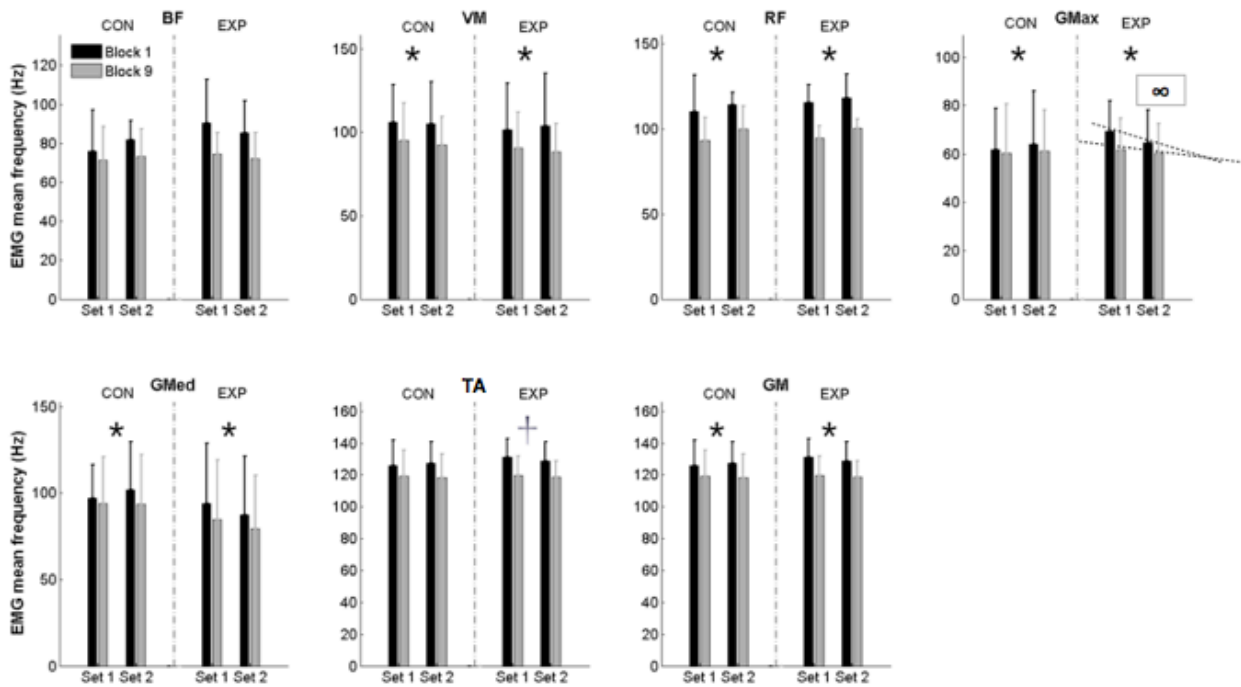


Figure 2. Left leg EMG mean frequency.

Values are the mean Hz.

Significant *block* effect; \*  $p < 0.05$

Significantly different from CON; †  $p < 0.05$

Significant EXP and *block* effect; ∞  $p < 0.05$

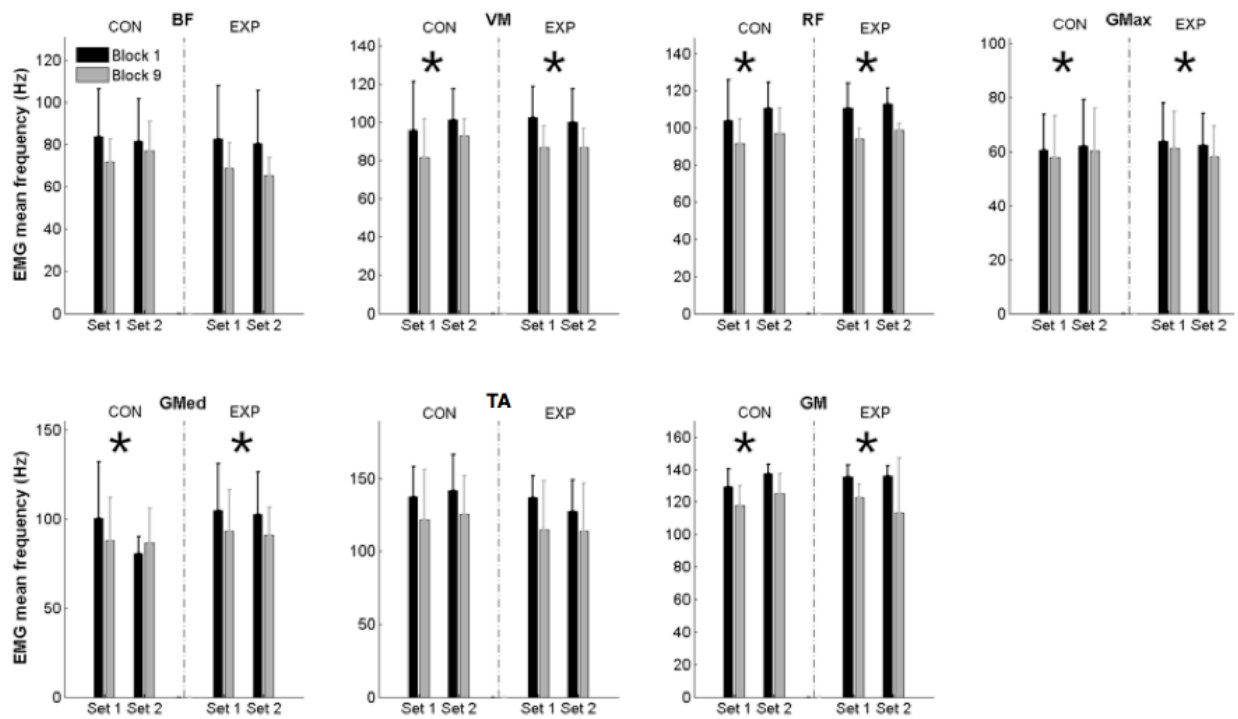


Figure 3. Right leg EMG mean frequency.

Values are the mean Hz.

Significant *block* effect; \*  $p < 0.05$

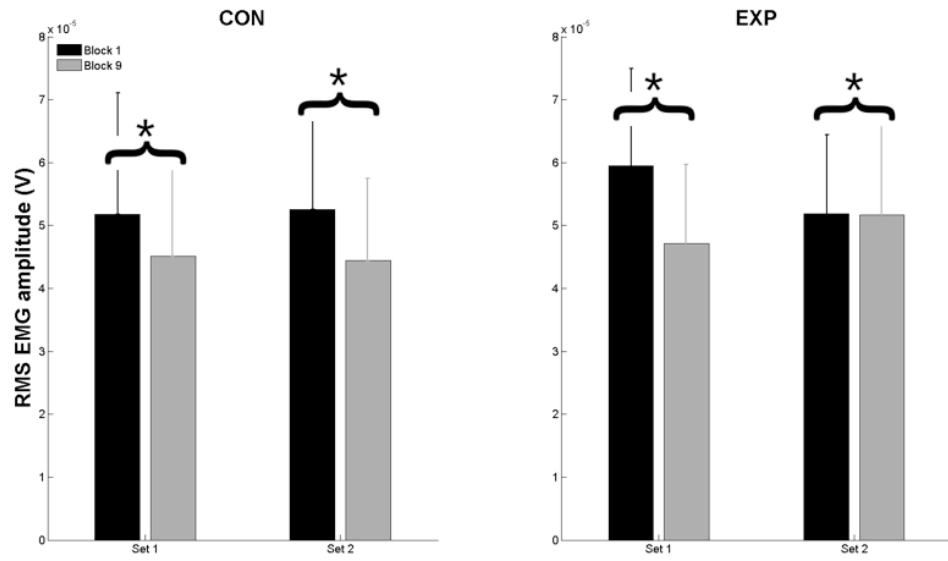


Figure 4. Right GM EMG amplitude (RMS)

Values are the mean RMS.

Significant *block* effect; \*  $p \leq 0.05$

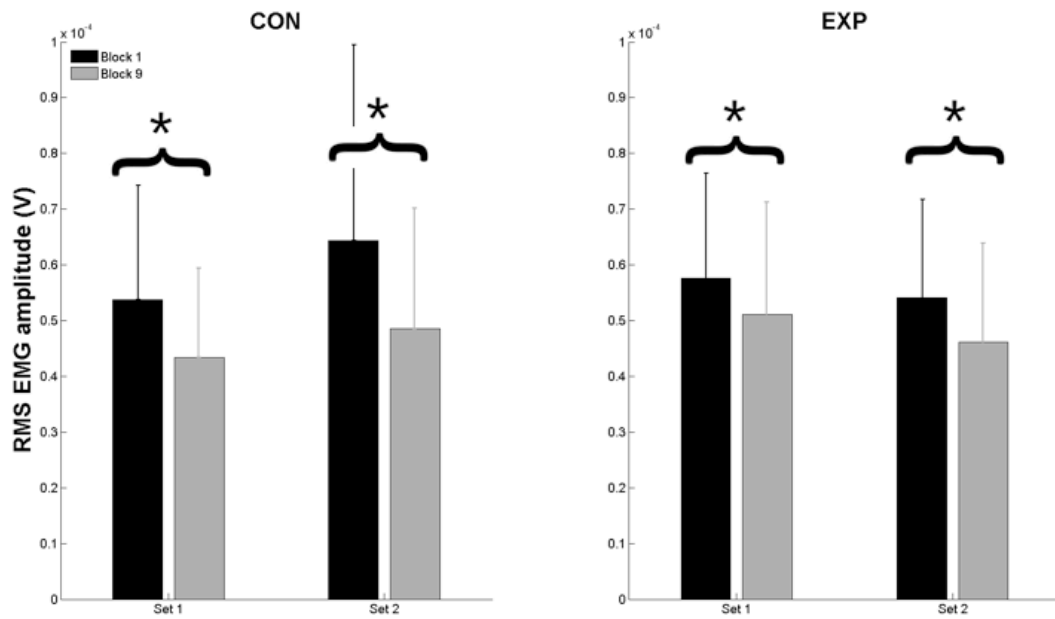


Figure 5. Left TA EMG amplitude (RMS)

Values are the mean volts (V).

Significant *block* effect; \* $p < 0.05$

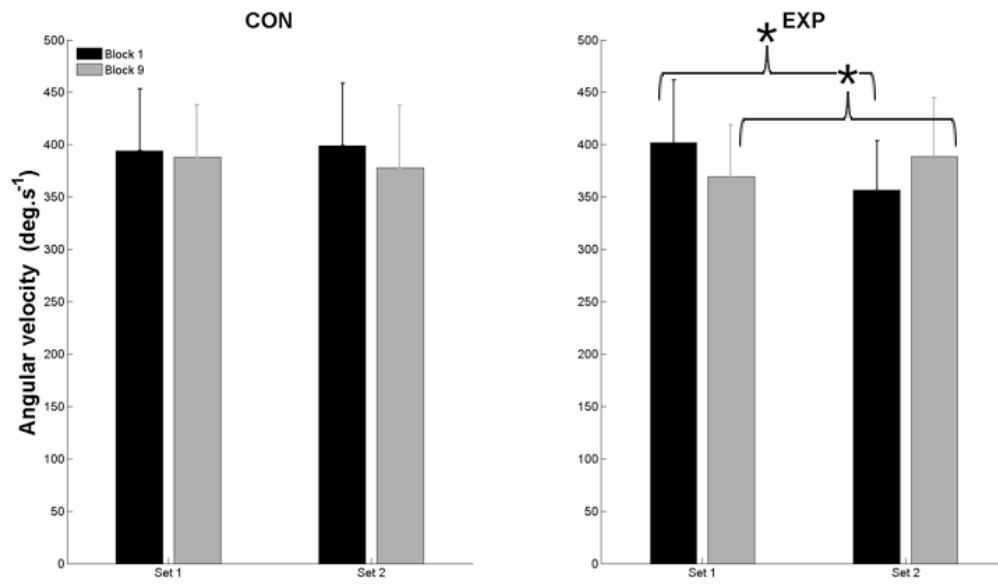


Figure 6. Hip angular velocity

Values are the mean deg.s<sup>-1</sup>.

Significant EXP and *set* effect; \*p<0.05

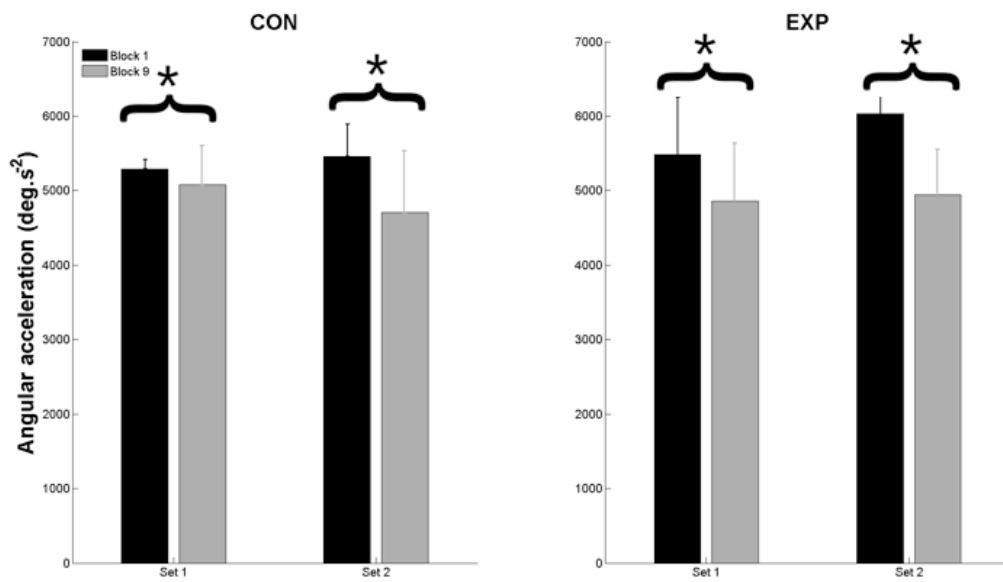


Figure 7. Ankle angular acceleration.

Values are the mean  $\text{deg}\cdot\text{s}^{-2}$ .

Significant *block* effect; \*  $p < 0.05$

## APPENDIX 1

Muscle	F <sub>1,4</sub>	p	$\eta^2p$	ES	pu
Right VM	8.7	<0.04	0.69	1.47	0.61
Right RF	25.59	<0.007	0.86	2.52	0.96
Right Gmax	13.8	<0.02	0.78	1.88	0.8
Right Gmed	23.3	<0.008	0.85	2.38	0.94
Right GM	8.04	<0.047	0.67	1.42	0.57
Left VM	12.67	<0.023	0.76	1.78	0.76
Left RF	22.04	<0.002	0.85	2.38	0.93
Left Gmax	51.86	<0.002	0.93	3.64	0.9995
Left Gmed	16.51	<0.0015	0.81	0.06	0.85
Left GM	70.94	<0.001	0.94	3.96	0.9999

Table 1. EMG mean frequencies block effects. Block size effect are defined as Cohen's f size effect (ES).  $\varepsilon = 1$

*VM* vastus medialis; *RF* rectus femoris; *Gmax* gluteus maximus; *Gmed* gluteus medius; *GM* gastrocnemius.



## **DISCUSSION GÉNÉRALE**

### **H) Rappel des résultats**

Aucune différence significative relativement à la puissance n'a été enregistrée entre les conditions CON et EXP. Par contre, les deux conditions ont enregistré une diminution significative entre les blocs ( $p < 0.008$ ). La fréquence moyenne a été diminuée pour tous les muscles, à l'exception du biceps fémoral (BF) et du tibial antérieur (TA). Le grand fessier (Gmax) et le TA de la condition EXP étaient significativement différents de la condition CON, ce qui ferait état d'une fatigue moindre. L'amplitude EMG (valeur quadratique moyenne - RMS) est demeurée inchangée pour tous les muscles dans les deux conditions, mais a diminué pour le gastrocnémien droit (GM) ( $p < 0.015$ ) et le TA gauche ( $p < 0.034$ ) entre le premier et dernier blocs de sauts. La vitesse angulaire de la hanche pour la première série de la condition EXP seulement a été diminuée et a été augmentée dans la deuxième série entre les blocs ( $p < 0.0009$ ), mais pas dans la condition CON. L'accélération angulaire à la cheville a été diminuée de manière significative dans les deux conditions ( $p < 0.048$ ).

### **I) Limites**

Quelques limites sont à soulever par rapport à ce projet. D'abord, l'échantillon était restreint puisqu'il s'agissait d'athlètes de haut niveau et que peu d'entre eux sont disponibles pour participer à ce genre de projets lorsqu'ils ne sont pas dans le cadre de leur entraînement.

Relativement au traitement de données, une marge d'erreur était présente au niveau de la cinématique car l'accélération n'était pas parfaitement verticale. De plus, une erreur est présente en raison de la synchronisation de l'accélération et de l'EMG exécutée de

manière manuelle. La fréquence d'échantillonnage était aussi différente sur quelques essais, donc elle a dû être ajustée manuellement.

De plus, il aurait été intéressant de mesurer la MVC pour chaque participant afin de pouvoir calculer la coactivation. Ceci aurait pu permettre de spécifier les stratégies compensatoires de manière plus précise et aurait peut-être permis de dégager certains phénomènes qui ne ressortent pas des analyses actuelles (compensations ou délais d'activation).

À propos du protocole de sauts, le fait de faire l'échauffement, le test de sauts, puis le protocole de pré-sollicitation pourrait avoir constitué un biais puisque l'effet potentiateur pourrait avoir eu lieu lors de la pré-sollicitation (2min après le protocole de sauts, qui est maximal). En plus de l'échauffement, cela aurait peut-être biaisé les données puisque beaucoup d'actions ont eu lieu avant l'étude principale. Le test de sauts aurait peut-être pu être fait à un autre moment et l'échauffement un peu plus tôt pour s'assurer que la fatigue et les effets de PAP se soient dissipés.

## **J) Applications pratiques**

D'abord, les résultats présentés dans ce projet pourraient guider les entraîneurs dans des protocoles de préparation physique. En effet, considérant l'asymétrie répertoriée chez les athlètes, la possibilité de potentialiser le membre le plus faible pourrait avoir des retombées intéressantes sur la performance et dans la diminution du risque de blessure. Tel qu'il a été observé pour le GM, TA et le Gmax de la jambe gauche, la pré-sollicitation pourrait être utile dans le but de diminuer l'ampleur des déséquilibres liés à l'asymétrie des membres inférieurs. De plus, le délai d'apparition de la fatigue pouvant être retardé, ceci pourrait aussi diminuer le risque de blessure considérant les modifications et déséquilibres moteurs et musculaires induits par la présence de fatigue. Ensuite, les cliniciens en réadaptation pourraient utiliser les constats de ce projet de recherche afin de guider leurs interventions dans un objectif de renforcement, sachant que l'apparition de la fatigue pourrait être retardée par un protocole de pré-sollicitation. Cela pourrait être d'autant plus utile au niveau du complexe de la hanche, connaissant son importance dans le risque de blessure au bas du corps et au bas du dos.

## **K) Avenues de recherche et perspectives**

À la lumière des résultats obtenus, il serait intéressant d'étudier l'effet d'une pré-sollicitation sur le membre non-dominant. Les résultats obtenus tendent à dire qu'une telle intervention permettrait d'induire des modifications au niveau du membre plus faible. De plus, il serait intéressant d'augmenter la taille de l'échantillon et de comparer les athlètes féminines et masculines. Sachant qu'une importance différence au niveau de la production de travail relatif existe entre les sujets féminin et masculin de part leurs différents facteurs physiologiques (hormones, conduction nerveuse, masse musculaire,

etc.) différents et que les deux groupes utilisent des stratégies compensatoires différentes en réponse à la fatigue musculaire des membres inférieurs (Padua et al., 2006), il serait intéressant de quantifier ces indices en réponse à un protocole semblable. Ceci permettrait d'individualiser de manière encore plus importante les stratégies de performance dans un contexte de sport de haut niveau.

En outre, il serait valable d'étudier l'impact qu'aurait une durée de pré-sollicitation (ex. 8s) par rapport à une même durée, mais exécutée de manière fractionnée (2 x 4s), et jusqu'à quel point (durée) les changements peuvent être observés.

Enfin, considérant la quantité importante de données acquises au cours du présent projet, d'autres valeurs acquises lors des traitements et analyses (EMG moyen, fréquence médiane, EMG des phases concentrique et excentrique du squat) pourraient être utilisées afin d'étudier d'autres phénomènes liés à la fatigue neuromusculaire et à plus grande échelle, au phénomène de co-contraction. Entre autres, le calcul de l'efficacité neuromusculaire (puissance par rapport à l'EMG) serait envisageable dans la mesure où il permettrait d'étayer les résultats et renforcer les conclusions sur les effets potentiels de la PAP. L'intégration de ces informations au travail permettrait de faire état des perturbations au niveau de la contractilité et par conséquent, préciser l'implication de la composante périphérique lors de l'analyse électromyographique en réponse à un exercice épuisant de sauts répétés.

## **L) Contribution personnelle au projet**

La réalisation de ce projet m'a amené à m'impliquer dans toutes les étapes nécessaires à l'élaboration et à la réalisation d'un projet de recherche. Après avoir participé à l'élaboration du protocole de recherche, j'ai rédigé le formulaire de

consentement de même que la demande d'approbation à l'intention du Comité d'éthique de la recherche en santé (CÉRES) de l'Université de Montréal. Une fois les sujets de l'équipe de patinage courte piste approchés par mon directeur, je me suis chargée de les rencontrer pour l'explication du projet en plus de faire la collecte de données complète. Pour y arriver, j'ai été autodidacte dans la familiarisation et l'utilisation du matériel de collecte de données (EMG, encodeur linéaire, accéléromètres) qui était, à ce jour, nouveau pour moi.

Sous la supervision de mon codirecteur David Amarantini, j'ai aussi effectué les traitements et analyses des données lors de mon séjour de recherche à Toulouse (FR). Cette expérience m'a permis d'élargir mes compétences en traitement des signaux électrophysiologiques et biomécaniques. L'expertise dans l'analyse fréquentielle et temporelle du signal électromyographique de Monsieur Amarantini m'a aussi permis de faciliter la compréhension des signaux dans des tâches complexes pluriarticulaires.

Suite au traitement des données, j'ai procédé aux analyses statistiques de même qu'à l'interprétation des résultats. Toujours sous la supervision de mon directeur et codirecteur (à distance), j'ai rédigé le présent manuscrit en vue d'une publication éventuelle dans un journal scientifique.

## **M) Conclusion**

En conclusion, une pré-sollicitation isométrique maximale des membres inférieurs n'engendre pas d'amélioration de la puissance mécanique développée lors d'une tâche épuisante de sauts maximaux répétés chez l'athlète et ne semble pas atténuer la réduction de performance liée à la fatigue. Cette pré-sollicitation des stabilisateurs à la hanche ne semble pas avoir eu d'impact sur les patrons de recrutement moteurs, mais

plutôt sur l'apparition retardée de la fatigue à ce même niveau. Malgré le fait qu'aucune augmentation de la puissance n'ait été enregistrée, qui aurait pu être expliquée pas des modifications de la coordination des muscles stabilisateurs à la hanche, la fréquence moyenne du tibial antérieur et du grand fessier gauche ont démontré une possible implication de stratégies compensatoires des membres inférieurs en réponse à une tâche fatigante de haute intensité. Ces stratégies sont d'autant plus intéressantes qu'elles ont eu lieu au niveau de la jambe non-dominante chez les patineurs de vitesse courte piste.

Cependant, au-delà des limites exposées précédemment, il est important de souligner une limite importante relativement à l'interprétation des résultats des signaux EMG obtenus, qui peuvent aussi être modulés par la composante périphérique tel que décrit dans la revue de littérature. Ainsi, les stratégies compensatoires induites par la commande neurale (recrutement) en réponse à un exercice fatigant n'expliqueraient pas exclusivement la modulation du signal EMG. En effet, les perturbations dans la propagation et la conduction de potentiels d'action au niveau de la membrane post-synaptique peuvent aussi influencer l'amplitude et la fréquence du signal enregistré. Il ne serait donc pas possible de conclure que seules les stratégies compensatoires d'ordre neural eut été responsables des modifications EMG, dans la mesure où il n'est pas impossible d'écarter la possibilité de l'implication de l'onde du muscle (*M-Wave*) dans l'enregistrement des signaux.

Les autres limites adressées pourraient expliquer la différence des présents résultats avec les nombreuses études démontrant les effets potentialisateurs d'une pré-

sollicitation maximale sur les performances de sauts. Il est cependant important de noter qu'aucune diminution de la performance significative en puissance n'a été enregistrée entre la situation contrôle et expérimentale, ce qui corrobore avec les résultats d'études qui n'ont pas enregistré d'augmentation de performances dans la littérature. La méthodologie proposée dans le présent projet, ajustée selon les limites énoncées, pourrait cependant être une avenue intéressante dans les protocoles d'entraînement et de préparation à une compétition dans le sport de haut niveau, entre autres dans les sports engendrant une asymétrie des membres inférieurs ou supérieurs.

À la lumière des résultats obtenus, l'asymétrie observée chez les patineurs de vitesse pourrait être compensée par une diminution de la fatigue ou une meilleure résistance à la fatigue des muscles du membre inférieur non-dominant. Les résultats de la présente étude indiquent donc la pertinence de considérer la pré-sollicitation dans un objectif de performance et de réadaptation sachant que l'asymétrie est omniprésente chez les athlètes et qu'elle est impliquée dans le risque de blessures.

## Références bibliographiques

- Abbate, F., Sargeant, A. J., Verdijk, P., and De Haan, A. (2000). Effects of high-frequency initial pulses and posttetanic potentiation on power output of skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*, *88*(1), 35–40.
- Ahtiainen, J. P., and Häkkinen, K. (2009). Strength athletes are capable to produce greater muscle activation and neural fatigue during high-intensity resistance exercise than nonathletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *23*(4), 1129.
- Babault, N., Desbrosses, K., Fabre, M.-S., Michaut, A., and Pousson, M. (2006). Neuromuscular fatigue development during maximal concentric and isometric knee extensions. *Journal of Applied Physiology*, *100*(3), 780–785. doi:10.1152/jappphysiol.00737.2005
- Babault, N., Maffiuletti, N. A., and Pousson, M. (2008). Postactivation Potentiation in Human Knee Extensors during Dynamic Passive Movements. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *40*(4), 735–743. doi:10.1249/MSS.0b013e318160ba54
- Baker, D. (2003). Acute Effect of Alternating Heavy and Light Resistances on Power Output During Upper-Body Complex Power Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *17*(3), 493.
- Baratta, R., Solomonow, M., Zhou, B. H., Letson, D., Chuinard, R., and D'Ambrosia, R. (1988). Muscular coactivation: The role of the antagonist musculature in



maintaining knee stability. *American Journal of Sports Medicine*, 16(2), 113–122.  
doi:10.1177/036354658801600205

Barton, C. J., Lack, S., Malliaras, P., and Morrissey, D. (2013). Gluteal muscle activity and patellofemoral pain syndrome: a systematic review. *British Journal of Sports and Exercise Medicine*, (47), 207–214.

Basmajian, J. V. (1978). *Muscles alive, their functions revealed by electromyography*.

Batista, M. A. B., Roschel, H., Barroso, R., Ugrinowitsch, C., and Tricoli, V. (2011). Influence of Strength Training Background on Postactivation Potentiation Response. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(9), 2496.

Batista, M. A. B., Ugrinowitsch, C., Roschel, H., Lotufo, R., Ricard, M. D., and Tricoli, V. A. A. (2007). Intermittent exercise as a conditioning activity to induce postactivation potentiation. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), 837.

Baudry, S., and Duchateau, J. (2004). Postactivation potentiation in human muscle is not related to the type of maximal conditioning contraction. *Muscle and nerve*. 30, 328–336,

Baudry, S., and Duchateau, J. (2007). Postactivation potentiation in a human muscle: effect on the load-velocity relation of tetanic and voluntary shortening contractions. *Journal of Applied Physiology*, 103(4), 1318–1325.

Berning, J. M., Adams, K. J., DeBeliso, M., Sevene-Adams, P. G., Harris, C., and Stamford, B. A. (2010). Effect of Functional Isometric Squats on Vertical Jump in

Trained and Untrained Men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(9), 2285–2289. doi:10.1519/JSC.0b013e3181e7ff9a

Bevan, H. R., Cunningham, D. J., Tooley, E. P., Owen, N. J., Cook, C. J., and Kilduff, L. P. (2010). Influence of postactivation potentiation on sprinting performance in professional rugby players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(3), 701–705.

Bevan, H. R., Owen, N. J., Cunningham, D. J., Kingsley, M. I., and Kilduff, L. P. (2009). Complex training in professional rugby players: Influence of recovery time on upper-body power output. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(6), 1780–1785.

Bigland-Ritchie, B., Jones, D. A., and Woods, J. J. (1979). Excitation frequency and muscle fatigue: Electrical responses during human voluntary and stimulated contractions. *Experimental Neurology*, 64(2), 414–427. doi:10.1016/0014-4886(79)90280-2

Billaut, F., and Bishop, D. (2009). Muscle fatigue in males and females during multiple-sprint exercise. *Sports Medicine*, 39(4), 257–278.

Billaut, F., Basset, F. A., and Falgairette, G. (2005). Muscle coordination changes during intermittent cycling sprints. *Neuroscience Letters*, 380(3), 265–269. doi:10.1016/j.neulet.2005.01.048

Binder-Macleod, S. A., Halden, E. E., and Jungles, K. A. (1995). Effects of stimulation intensity on the physiological responses of human motor units. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 27(4), 556–565.

- Binder-Macleod, S., and Kesar, T. (2005). Catchlike property of skeletal muscle: Recent findings and clinical implications. *Muscle and nerve*, 31(6), 681–693. doi:10.1002/mus.20290
- Bishop, D. (2003). Warm up I: potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. *Sports Medicine*, 33(6), 439–454.
- Boudreau, S. N., Dwyer, M. K., Mattacola, C. G., Lattermann, C., Uhl, T. L., and McKeon, J. M. (2009). Hip-muscle activation during the lunge, single-leg squat, and step-up-and-over exercises. *Journal of sport rehabilitation*, 18(1), 1–14.
- Brunner-Ziegler, S., Strasser, B., and Haber, P. (2011). Comparison of metabolic and biomechanic responses to active vs. passive warm-up procedures before physical exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(4), 909.
- Buttifiant, D., Crow, J., Kearney, S., and Hrysomallis, C. (2011). Whole Body Vibration vs. Gluteal Muscle Activation: What are the Acute Effects on Explosive Power? *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25, S14.
- Cambridge, E. D. J., Nathalie Sidorkewicz, and McGill, S. M. (2012). *Hip and Spine Motion During Progressive Hip Rehabilitation Implications for the Low Back Pain Patient* (Vol. 6, pp. 13–14). Canadian Journal of Kinesiology.
- Carregaro, R. L., Gentil, P., Brown, L. E., Pinto, R. S., and Bottaro, M. (2011). Effects of antagonist pre-load on knee extensor isokinetic muscle performance. *Journal of Sports Sciences*, 29(3), 271–278. doi:10.1080/02640414.2010.529455

- Chiu, L. Z. F., Fry, A. C., Schilling, B. K., Johnson, E. J., and Weiss, L. W. (2004). Neuromuscular fatigue and potentiation following two successive high intensity resistance exercise sessions. *European Journal of Applied Physiology*, 92(4-5). doi:10.1007/s00421-004-1144-z
- Chiu, L. Z. F., Fry, A. C., Weiss, L. W., Schilling, B. K., Brown, L. E., and Smith, S. L. (2003). Postactivation Potentiation Response in Athletic and Recreationally Trained Individuals. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17(4), 671.
- Clark, R. A., Bryant, A. L., and Reaburn, P. (2006). The acute effects of a single set of contrast preloading on a loaded countermovement jump training session. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(1), 162–166.
- Colliander, E. B., Dudley, G. A., and Tesch, P. A. (1988). Skeletal muscle fiber type composition and performance during repeated bouts of maximal, concentric contractions. *European Journal of Applied Physiology*, 58(1-2), 81–86. doi: 10.1007/BF00636607
- Costill, D. L., Daniels, J., Evans, W., Fink, W., Krahenbuhl, G., and Saltin, B. (1976). Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes. *Journal of Applied Physiology*, 40(2), 149–154.
- Côté, J. N., Mathieu, P. A., Levin, M. F., and Feldman, A. G. (2002). Movement reorganization to compensate for fatigue during sawing. *Experimental Brain Research*, 146(3), 394–398. doi:10.1007/s00221-002-1186-6
- Crewther, B. T., Cook, C. J., and Lowe, T. E. (2011). The effects of short-cycle sprints on power, strength, and salivary hormones in elite rugby players. *The Journal of ....*

- Crow, J. F., Buttifant, D., Kearny, S. G., and Hrysomallis, C. (2012). Low Load Exercises Targeting the Gluteal Muscle Group Acutely Enhance Explosive Power Output in Elite Athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(2), 438.
- De Ruiter, C. J., Van Leeuwen, D., Heijblom, A., Bobbert, M. F., and De Hann, A. (2006). Fast unilateral isometric knee extension torque development and bilateral jump height. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(10), 1843–1852. doi: 10.1249/01.mss.0000227644.14102.50
- Derenne, C. (2010). Effects of Postactivation Potentiation Warm-up in Male and Female Sport Performances: A Brief Review. *Strength and Conditioning Journal*, 32(6), 58–64. doi:10.1519/SSC.0b013e3181f412c4
- Ding, J., Storaska, J. A., and Binder-Macleod, S. A. (2003). Effect of potentiation on the catchlike property of human skeletal muscles. *Muscle and nerve*, 27(3), 312–319.
- Docherty, D., and Hodgson, M. J. (2007). The application of postactivation potentiation to elite sport. *International journal of sports physiology and performance*, 2(4), 439.
- Draganich, L., Jaeger, R., and Kralj, A. (1989). Coactivation of the hamstrings and quadriceps during extension of the knee. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 71(7), 1075.
- Duthie, G. M., Young, W. B., and Aitken, D. A. (2002). The acute effects of heavy loads on jump squat performance: An evaluation of the complex and contrast methods of power development. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 16(4), 530–538.

- Dwyer, M. K., Boudreau, S. N., Mattacola, C. G., Uhl, T. L., and Lattermann, C. (2010). Comparison of lower extremity kinematics and hip muscle activation during rehabilitation tasks between sexes. *Journal of Athletic Training*, 45(2), 181.
- Enoka, R. M., and Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *The Journal of Physiology*, 586(1), 11–23. doi: 10.1113/jphysiol.2007.139477
- Esformes, J. I., Cameron, N., and Bampouras, T. M. (2010). Postactivation potentiation following different modes of exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(7), 1911.
- Esformes, J. I., Keenan, M., Moody, J., and Bampouras, T. M. (2011). Effect of different types of conditioning contraction on upper body postactivation potentiation. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(1), 143.
- Feros, S. A., Young, W. B., Rice, A. J., and Talpey, S. W. (2012). The effect of including a series of isometric conditioning contractions to the rowing warm-up on 1000 m rowing ergometer time trial performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 1. doi:10.1519/JSC.0b013e3182495025
- Folland, J. P., and Williams, A. G. (2007). Morphological and Neurological Contributions to Increased Strength. *Sports Medicine*.
- Folland, J. P., Wakamatsu, T., and Fimland, M. S. (2008). The influence of maximal isometric activity on twitch and H-reflex potentiation, and quadriceps femoris performance. *European Journal of Applied Physiology*, (104), 739–748.

- French, D. N., Kraemer, W. J., and Cooke, C. B. (2003). Changes in Dynamic Exercise Performance Following a Sequence of Preconditioning Isometric Muscle Actions. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17(4), 678.
- Frigon, A., Thompson, C. K., Johnson, M. D., Manuel, M., Hornby, T. G., and Heckman, C. J. (2011). Extra forces evoked during electrical stimulation of the muscle or its nerve are generated and modulated by a length-dependent intrinsic property of muscle in humans and cats. *The Journal of Neuroscience*, 31(15), 5579–5588.
- Gabriel, D. A., Kamen, G., and Frost, G. (2006). Neural Adaptations to Resistive Exercise. *Sports Medicine*, 36(2), 133–149. doi: 10.2165/00007256-200636020-00004
- Garrandes, F., Colson, S. S., Pensini, M., Seynnes, O., and Legros, P. (2007). Neuromuscular Fatigue Profile in Endurance-Trained and Power-Trained Athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(1), 149–158. doi: 10.1249/01.mss.0000240322.00782.c9
- Gear, W. S. (2011). Effect of different levels of localized muscle fatigue on knee position sense. *Journal of Sports Science and Medicine*, 10, 725–730.
- Gelen, E. (2010). Acute effects of different warm-up methods on sprint, slalom dribbling, and penalty kick performance in soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(4), 950.
- Gerdle, B., Karlsson, S., Crenshaw, A. G., and Friden, J. (1997). The relationships between EMG and muscle morphology throughout sustained static knee

extension at two submaximal force levels. *Acta Physiologica Scandinavica*, 160(4), 341–351.

Gilbert, G., and Lees, A. (2005). Changes in the force development characteristics of muscle following repeated maximum force and power exercise. *Ergonomics*, 48(11-14), 1576–1584. doi:10.1080/00140130500101163

Girard, O., Lattier, G., Maffiuletti, N. A., Micallef, J.-P., & Millet, G. P. (2008). Neuromuscular fatigue during a prolonged intermittent exercise: Application to tennis. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 18(6), 1038–1046. doi: 10.1016/j.jelekin.2007.05.005

Gossard, J. P., Floeter, M. K., Kawai, Y., Burke, R. E., Chang, T., and Schiff, S. J. (1994). Fluctuations of excitability in the monosynaptic reflex pathway to lumbar motoneurons in the cat. *Journal of Neurophysiology*, 72(3), 1227–1239.

Gossen, E. R., and Sale, D. G. (2000). Effect of postactivation potentiation on dynamic knee extension performance - Springer. *European Journal of Applied Physiology*, (83), 524–530.

Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Kasimatis, P., Mavromatis, G., and Garas, A. (2003). Effect of a Submaximal Half-Squats Warm-up Program on Vertical Jumping Ability. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17(2), 342.

Güllich, A., and Schmidtbleicher, D. (1996). MVC-induced short-term potentiation of explosive force. *New Studies in Athletics*, 67–81.



- Hamada, T., Sale, D. G., MacDougall, J. D., and Tarnopolsky, M. A. (2000). Postactivation potentiation, fiber type, and twitch contraction time in human knee extensor muscles. *Journal of Applied Physiology*, *88*(6), 2131–2137.
- Hanson, E. D., Leigh, S., and Mynark, R. G. (2007). Acute effects of heavy-and light-load squat exercise on the kinetic measures of vertical jumping. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *21*(4), 1012.
- Hirst, G. D., Redman, S. J., and Wong, K. (1981). Post-tetanic potentiation and facilitation of synaptic potentials evoked in cat spinal motoneurons. *The Journal of Physiology*, *321*(1), 97–109.
- Hodgson, M. J., Docherty, D., and Zehr, E. P. (2008). Postactivation potentiation of force is independent of h-reflex excitability. *International journal of sports physiology and performance*, *3*(2), 219.
- Hodgson, M., Docherty, D., and Robbins, D. (2005). Post-activation potentiation: underlying physiology and implications for motor performance. *Sports Medicine*, *35*(7), 585–595.
- Holtermann, A., Roeleveld, K., Engstrøm, M., and Sand, T. (2007). Enhanced H-reflex with resistance training is related to increased rate of force development. *European Journal of Applied Physiology*, *101*(3), 301–312. doi:10.1007/s00421-007-0503-y
- Hrysomallis, C., and Kidgell, D. (2001). Effect of Heavy Dynamic Resistive Exercise on Acute Upper-Body Power. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *15*(4), 426.

- Huffenus, A.-F., Amarantini, D., and Forestier, N. (2006). Effects of distal and proximal arm muscles fatigue on multi-joint movement organization. *Experimental Brain Research*, 170(4), 438–447. doi:10.1007/s00221-005-0227-3
- Hunter, S. K., and Enoka, R. M. (2001). Sex differences in the fatigability of arm muscles depends on absolute force during isometric contractions. *Journal of Applied Physiology*.
- Izquierdo, M., Häkkinen, K., and Gonzalez-Badillo, J. J. (2002). Effects of long-term training specificity on maximal strength and power of the upper and lower extremities in athletes from different sports. *European Journal of Applied Physiology*, (87), 264–271.
- Jacobs, R., and van Ingen Schenau, G. J. (1992). Control of an external force in leg extensions in humans. *The Journal of Physiology*, 457(1), 611–626.
- James, C. R., Scheuermann, B. W., and Smith, M. P. (2010). Effects of two neuromuscular fatigue protocols on landing performance. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20(4), 667–675. doi:10.1016/j.jelekin.2009.10.007
- Jensen, R. L., and Ebben, W. P. (2003). Kinetic Analysis of Complex Training Rest Interval Effect on Vertical Jump Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17(2), 345.
- Jo, E., Judelson, D. A., Brown, L. E., Coburn, J. W., and Dabbs, N. C. (2010). Influence of recovery duration after a potentiating stimulus on muscular power in

- recreationally trained individuals. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(2), 343.
- Jones, P., and Lees, A. (2003). A Biomechanical Analysis of the Acute Effects of Complex Training Using Lower Limb Exercises. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17(4), 694.
- Karatzafieri, C., De Haan, A., van Mechelen, W., and Sargeant, A. J. (2001). Metabolic changes in single human muscle fibres during brief maximal exercise. *Experimental Physiology*, 86(3), 411–415. doi:10.1113/eph8602223
- Kay, D., St Clair Gibson, A., Mitchell, M. J., Lambert, M. I., and Noakes, T. D. (2000). Different neuromuscular recruitment patterns during eccentric, concentric and isometric contractions. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 10(6), 425–431. doi:10.1016/S1050-6411(00)00031-6
- Kellis, E. (1998). Quantification of quadriceps and hamstring antagonist activity. *Sports Medicine*, 25(1), 37–62.
- Kellis, E., and Kouvelioti, V. (2009). Agonist versus antagonist muscle fatigue effects on thigh muscle activity and vertical ground reaction during drop landing. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(1), 55–64. doi:10.1016/j.jelekin.2007.08.002
- Kent-Braun, J. A. (1999). Central and peripheral contributions to muscle fatigue in humans during sustained maximal effort. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 80(1), 57–63.

- Kersey, R. D., and Rowan, L. (1983). Injury account during the 1980 NCAA wrestling championships. *American Journal of Sports Medicine*, 11(3), 147–151.
- Khamoui, A. V. (2008). *Effect of Potentiating Exercise Volume on Vertical Jump*.
- Khamoui, A. V., Brown, L. E., Coburn, J. W., Judelson, D. A., Uribe, B. P., Nguyen, D., et al. (2009a). Effect of potentiating exercise volume on vertical jump parameters in recreationally trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(5), 1465–1469.
- Khamoui, A. V., Jo, E., and Brown, L. (2009b). Postactivation potentiation and athletic performance. *NSCA Hot Topic Series, National Strength and Conditioning Association*.
- Kibler, W. B., Press, J., and Sciascia, A. (2006). The Role of Core Stability in Athletic Function - Springer. *Sports Medicine*, 36(3), 189–198.
- Kilduff, L. P., Bevan, H. R., Kingsley, M. I., Owen, N. J., Bennett, M. A., Bunce, P. J., et al. (2007). Postactivation potentiation in professional rugby players: Optimal recovery. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(4), 1134–1138.
- Kilduff, L. P., Owen, N., Bevan, H., Bennett, M., Kingsley, M. I. C., and Cunningham, D. (2008). Influence of recovery time on post-activation potentiation in professional rugby players. *Journal of Sports Sciences*, 26(8), 795–802. doi: 10.1080/02640410701784517

- Kilduff, L.P., Cunningham, D. J., Owen, N. J., West, D. J., Bracken, R. M., and Cook, C. J. (2011). Effect of postactivation potentiation on swimming starts in international sprint swimmers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(9), 2418.
- Klug, G. A., Botterman, B. R., and Stull, J. T. (1982). The effect of low frequency stimulation on myosin light chain phosphorylation in skeletal muscle. *Journal of Biological Chemistry*, 257(9), 4688–4690.
- Krustrup, P., S derlund, K., Mohr, M., Gonz lez-Alonso, J., and Bangsbo, J. (2004). Recruitment of fibre types and quadriceps muscle portions during repeated, intense knee-extensor exercise in humans. *Pfl gers Archiv - European Journal of Physiology*, 449(1), 56–65. doi:10.1007/s00424-004-1304-3
- Kubo, K., Morimoto, M., Komuro, T., Yata, H., Tsunoda, N., Kanehisha, H., and Fukunaga, T. (2007). Effects of Plyometric and Weight Training on Muscle-Tendon Complex and Jump Performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(10), 1801–1810. doi:10.1249/mss.0b013e31813e630a
- Lee, S. C., Gerdom, M. L., and Binder-Macleod, S. A. (1999). Effects of length on the catchlike property of human quadriceps femoris muscle. *Physical Therapy*, 79(8), 738–748.
- Lorenz, D. (2011). Postactivation Potentiation: An Introduction. *International journal of sports physical therapy*, 6(3), 234.
- Lorenz, D. S., and Reiman, M. P. (2011). Performance Enhancement in the Terminal Phases of Rehabilitation. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, 3(5), 470–480. doi:10.1177/1941738111415039

- Macdonald, J. H., Farina, D., and Marcora, S. M. (2008). Response of Electromyographic Variables during Incremental and Fatiguing Cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(2), 335–344. doi:10.1249/mss.0b013e31815b491e
- Magalhães, F. H., de Toledo, D. R., and Kohn, A. F. (2013). Plantar flexion force induced by amplitude-modulated tendon vibration and associated soleus V/F-waves as an evidence of a centrally-mediated mechanism contributing to extra torque generation in humans. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 10(1), 32.
- Markovic, G., Simek, S., and Bradic, A. (2008). Are acute effects of maximal dynamic contractions on upper-body ballistic performance load specific? *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(6), 1811–1815.
- McBride, J. M., Nimphius, S., and Erickson, T. M. (2005). The acute effects of heavy-load squats and loaded countermovement jumps on sprint performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(4), 893–897.
- Mendez-Villanueva, A., Hamer, P., and Bishop, D. (2008). Fatigue in repeated-sprint exercise is related to muscle power factors and reduced neuromuscular activity. *European Journal of Applied Physiology*, 103(4), 411–419. doi:10.1007/s00421-008-0723-9
- Millet, G. Y., & Lepers, R. (2004). Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercises. *Sports Medicine*, 34(2), 105–116.

- Mitchell, C. J., and Sale, D. G. (2011). Enhancement of jump performance after a 5-RM squat is associated with postactivation potentiation. *European Journal of Applied Physiology*, 111(8), 1957–1963. doi:10.1007/s00421-010-1823-x
- Miyamoto, N., and Kanehisa, H. (2012). Potentiation of Maximal Voluntary Concentric Torque in Human Quadriceps Femoris. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(9), 1738–1746.
- Miyamoto, N., KANEHISA, H., Fukunaga, T., and Kawakami, Y. (2011). Effect of postactivation potentiation on the maximal voluntary isokinetic concentric torque in humans. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(1), 186–192.
- Moore, R. L., and Stull, J. T. (1984). Myosin light chain phosphorylation in fast and slow skeletal muscles in situ. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 247(5), C462–C471.
- Moorhouse, K. M., and Granata, K. P. (2007). Role of reflex dynamics in spinal stability: Intrinsic muscle stiffness alone is insufficient for stability. *Journal of Biomechanics*, 40(5), 1058–1065. doi:10.1016/j.jbiomech.2006.04.018
- Moritani, T., and Muro, M. (1987). Motor unit activity and surface electromyogram power spectrum during increasing force of contraction. *European Journal of Applied Physiology*, 56(3), 260–265. doi:10.1007/BF00690890
- Moritani, T., Muro, M., and Nagata, A. (1986). Intramuscular and surface electromyogram changes during muscle fatigue. *Journal of Applied Physiology*.

- Moxham, J., Edwards, R. H., Aubier, M., De Troyer, A., Farkas, G., Macklem, P. T., and Roussos, C. (1982). Changes in EMG power spectrum (high-to-low ratio) with force fatigue in humans.
- Padua, D., L Arnold, B., H Perrin, D., M Gansneder, B., R Carcia, C., and P Granata, K. (2006). Fatigue, Vertical Leg Stiffness, and Stiffness Control Strategies in Males and Females. *Journal of Athletic Training*, 3, 294–304.
- Parry, S., Hancock, S., Shiells, M., Passfield, L., Davies, B., and Baker, J. (2008). Physiological Effects of Two Different Postactivation Potentiation Training Loads on Power Profiles Generated During High Intensity Cycle Ergometer Exercise. *Research in Sports Medicine*, 16(1), 56–67. doi:10.1080/15438620701878998
- Pääsuke, M., Ereline, J., and Gapeyeva, H. (1999). Neuromuscular fatigue during repeated exhaustive submaximal static contractions of knee extensor muscles in endurance-trained, power-trained and untrained men. *Acta Physiologica Scandinavica*, 166(4), 319–326
- Pääsuke, M., Saapar, L., Ereline, J., and Gapeyeva, H. (2007). Postactivation potentiation of knee extensor muscles in power-and endurance-trained, and untrained women. *Eur J Appl Physiol*, 101, 577–585
- Perrey, S., Racinais, S., Saimouaa, K., & Girard, O. (2010). Neural and muscular adjustments following repeated running sprints. *Eur J Appl Physiol*, 109(6), 1027–1036. doi:10.1007/s00421-010-1445-3



- Pincivero, D. M., Aldworth, C., Dickerson, T., Petry, C., and Shultz, T. (2000). Quadriceps-hamstring EMG activity during functional, closed kinetic chain exercise to fatigue. *Eur J Appl Physiol*, 81(6), 504–509.
- Powers, C. M. (2010). The influence of abnormal hip mechanics on knee injury: a biomechanical perspective. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 40(2), 42–51.
- Psek, J.-A., and Cafarelli, E. (1993). Behavior of coactive muscles during fatigue. *J Appl Physiol*, 74(1), 170–175.
- Rahimi, R. (2007). The acute effects of heavy versus light-load squats on sprint performance. *Facta universitatis-series: Physical Education and Sport*, 5(2), 163–169.
- Rassier, D., and Macintosh, B. (2000). Coexistence of potentiation and fatigue in skeletal muscle. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 33(5), 499–508.
- Ratkevicius, A., and Quistorff, B. (2002). Metabolic costs of force generation for constant-frequency and catchlike-inducing electrical stimulation in human tibialis anterior muscle. *Muscle and nerve*, 25(3), 419–426.
- Reiman, M. P., Bolgla, L. A., and Loudon, J. K. (2012). A literature review of studies evaluating gluteus maximus and gluteus medius activation during rehabilitation exercises. *Physiotherapy Theory and Practice*, 28(4), 257–268. doi: 10.3109/09593985.2011.604981

- Rixon, K. P., Lamont, H. S., and Bemben, M. G. (2007). Influence of type of muscle contraction, gender, and lifting experience on postactivation potentiation performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(2), 500.
- Robbins, D. W. (2005). Postactivation potentiation and its practical applicability. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(2), 453–458.
- Robbins, D. W., and Docherty, D. (2005). Effect of loading on enhancement of power performance over three consecutive trials. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(4), 898.
- Rodacki, A. L. F., Fowler, N. E., and Bennett, S. J. (2001). Multi-segment coordination: fatigue effects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(7), 1157.
- Rodacki, A. L. F., Fowler, N. E., and Bennett, S. J. (2002). Vertical jump coordination: fatigue effects. *Med Sci Sports Exerc*, 34(1), 105–116.
- Sale, D. G. (2002). Postactivation potentiation: role in human performance. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 30(3), 138.
- Schillings, M. L., Hoefsloot, W., Stegeman, D. F., and Zwarts, M. J. (2003). Relative contributions of central and peripheral factors to fatigue during a maximal sustained effort. *European Journal of Applied Physiology*, 90(5-6), 562–568. doi: 10.1007/s00421-003-0913-4
- Schoenfeld, B. J. (2010). Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3497–3506.

- Scott, S., and Docherty, D. (2004). Acute effects of heavy preloading on vertical and horizontal jump performance. (D. Docherty, Ed.) *Journal of Strength Conditioning in Research*, 2, 1–6.
- Seitz, L. (2011). *Mechanisms Underpinning Postactivation Potentiation Following Voluntary Isokinetic Knee Extensions* (pp. 1–24). Western Australia: School of Exercise and Health Sciences.
- Smith, A. E., Fry, A. C., Weiss, L. W., Li, Y., and Kinzey, S. J. (2001). The Effects of High-Intensity Exercise on a 10-Second Sprint Cycle Test. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15(3), 344.
- Stewart, D., Macaluso, A., and De Vito, G. (2003). The effect of an active warm-up on surface EMG and muscle performance in healthy humans. *European Journal of Applied Physiology*, 89(6), 509–513. doi:10.1007/s00421-003-0798-2
- Sweeney, H. L., Bowman, B. F., and Stull, J. T. (1993). Myosin light chain phosphorylation in vertebrate striated muscle: regulation and function. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 264(5), C1085–C1095.
- Szczesna, D., Zhao, J., Jones, M., Zhi, G., Stull, J., and Potter, J. D. (2002). Phosphorylation of the regulatory light chains of myosin affects Ca<sup>2+</sup> sensitivity of skeletal muscle contraction. *Journal of Applied Physiology*, 92(4), 1661–1670.
- Tesch, P. A., and Karlsson, J. (1985). Muscle fiber types and size in trained and untrained muscles of elite athletes. *Journal of Applied Physiology*, 59(6), 1716–1720.

- Tillin, N. A., and Bishop, D. (2009). Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Medicine*, 39(2), 147–166.
- Tomazin, K., Morin, J., Strojnik, V., Podpecan, A., and Millet, G. (2011). Fatigue after short (100-m), medium (200-m) and long (400-m) treadmill sprints. *European Journal of Applied Physiology*, 1–10.
- Van Dieën, J. H., Luger, T., and Van Der Eb, J. (2011). Effects of fatigue on trunk stability in elite gymnasts. *European Journal of Applied Physiology*, 1–7.
- Van Praagh, E. (2007). *Physiologie du sport: Enfant et adolescent* - Google Books.
- Weber, K. R., Brown, L. E., Coburn, J. W., and Zinder, S. M. (2008). Acute effects of heavy-load squats on consecutive squat jump performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(3), 726.
- Williams, J. H. (1997). Contractile apparatus and sarcoplasmic reticulum function: effects of fatigue, recovery, and elevated  $Ca^{2+}$ . *Journal of Applied Physiology*, 83(2), 444–450.
- Wilson, J. M., Duncan, N. M., Marin, P. J., Brown, L. E., Loenneke, J. P., Wilson, S. M., et al. (2013). Meta-Analysis of Postactivation Potentiation and Power: Effects of Conditioning Activity, Volume, Gender, Rest Periods, and Training Status. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(3), 854–859.

Witmer, C. A., Davis, S. E., and Moir, G. L. (2010). The acute effects of back squats on vertical jump performance in men and women. *Journal of Sports Science and Medicine*, 9, 206–213.

Young, W. B., Jenner, A., and Griffiths, K. (1998). Acute Enhancement of Power Performance From Heavy Load Squats. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 12(2), 82.

