

Les liens entre le niveau de fatigue neuromusculaire et l'altération du contrôle postural : d'une recherche fondamentale vers des implications cliniques en physiothérapie

Relationship between the level of neuromuscular fatigue and postural control alteration: from fundamental research to clinical practice in physiotherapy

NICOLAS MAMIE (PT, MSc)^{1,2}, NICOLAS PLACE (PhD)³, FRANCIS DEGACHE (PhD)^{2,4}, PIERRE BALTHAZARD (PT, DO, MSc)²

1. Zénith Physio Sàrl, Neuchâtel, Suisse.
2. HESAV Haute Ecole de Santé Vaud, HES-SO Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale, Lausanne, Suisse.
3. Institut des sciences du sport de l'université de Lausanne (ISSUL), Université de Lausanne (UNIL), Lausanne, Suisse.
4. Therapeutic and performance sports Institute - MotionLab - Lausanne.

Cette étude a été approuvée par la Commission cantonale d'éthique de la recherche sur l'être humain du canton de Vaud en date du 21 mai 2014 (protocole 129/14).

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflit d'intérêt en lien avec cet article.

Article reçu en janvier 2019; accepté en avril 2019.

Keywords

Postural stability, postural balance, equilibrium, muscle fatigue, stabilometry, posturography

Mots clés

Stabilité posturale, fatigue musculaire, stabilométrie, posturographie

Abstract

Introduction: Neuromuscular fatigue impairs postural control. However, knowledge on the relationship between the amount/type of neuromuscular fatigue and postural control alteration remains ambiguous. The goal of this study is to determine whether there is a « dose-response » relationship between the amount/type of neuromuscular fatigue and the amount of postural control alteration.

Method: Ten men performed 8 series of 30 seconds of plantar flexions on a step. Neuromuscular fatigue and postural control alteration were assessed from tibial nerve transcutaneous stimulations and center of pressure (CoP) displacements. Statistical tests (ANOVA, Tuckey's post-hoc test, Pearson correlation) were conducted to analyze the variance of the variables and to determine their degree of correlation.

Résumé

Introduction: La fatigue neuromusculaire altère le contrôle postural. Cependant, les connaissances sur les liens entre le niveau/type de fatigue neuromusculaire et le contrôle postural restent lacunaires. L'objectif est donc de déterminer s'il existe une relation « dose-réponse » entre le niveau/type de fatigue neuromusculaire et le niveau d'altération du contrôle postural.

Méthode: Dix hommes ont exécuté 8 séries de 30 secondes de flexions plantaires sur une marche. La fatigue neuromusculaire des muscles fléchisseurs plantaires et le contrôle postural ont été évalués par des neurostimulations transcutanées et l'analyse du centre de pression (CdP). Des tests statistiques (ANOVA, post-hoc Tuckey, corrélation de Pearson) ont été effectués afin d'analyser l'évolution des variables et d'évaluer leurs liens.

Results: Neuromuscular force variables (maximal voluntary contraction (MVC), voluntary activation level (VAL), 100HZ doublet and 10HZ/100HZ ratio) were significantly decreased, and postural control variables (mean speed and length displacements of CoP) were significantly increased between pre-exercise condition and post-4th series, post-6th series and post-exercise conditions ($P < 0.05$). Correlation was significantly present only between the decrease of MVC force and the decrease of VAL at post-6th series ($r = 0.87$, $P < 0.001$) and post-exercise ($r = 0.82$, $P < 0.05$).

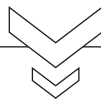
Discussion: The amount of postural control alteration is not related to the amount/type of neuromuscular fatigue. Central fatigue may influence primarily the level of neuromuscular fatigue. The analysis of postural control after a fatiguing task is advisable for patient care in physiotherapy.

Conclusions: The results of this study do not validate a « dose-response » relationship between the amount/type of neuromuscular fatigue and the amount of postural control alteration.

Résultats: Des diminutions significatives de force neuromusculaire (contraction maximale volontaire (CMV), activation maximale volontaire (AMV), doublet 100HZ et ratio 10HZ/100HZ) et des augmentations significatives de contrôle postural (vitesse et longueur de déplacement du CdP) ont été obtenues entre la condition pré-exercice et les conditions post-4ème série, post-6ème série et post-exercice ($P < 0.05$). Des corrélations significatives n'existent qu'entre la diminution de force des CMV et la diminution de l'AMV en post-6ème série ($r = 0.87$, $P < 0.001$) et post-exercice ($r = 0.82$, $P < 0.05$).

Discussion: Le niveau d'altération du contrôle postural ne semble pas corrélé au niveau/type de fatigue neuromusculaire. La fatigue centrale influence prioritairement le niveau de fatigue neuromusculaire. L'analyse du contrôle postural en post-effort est recommandable pour la prise en charge de problématiques en physiothérapie.

Conclusion: Il ne semble pas exister de relation « dose-réponse » entre le niveau/type de fatigue neuromusculaire et l'altération du contrôle postural.



1. Introduction

Le contrôle postural est une adaptation continue de la posture permettant de garantir la stabilité⁽¹⁾. Il s'agit d'un processus permanent et inconscient dans la plupart des cas, et dont les mécanismes sont d'une extrême complexité. De nombreux travaux se sont intéressés aux facteurs pouvant influencer le contrôle postural⁽²⁾, et plus particulièrement à l'impact de la fatigue neuromusculaire sur sa régulation en condition statique. S'il est acquis que la fatigue neuromusculaire influence le contrôle postural⁽¹⁾, les connaissances sur les relations entre le niveau ou le type de fatigue neuromusculaire et le niveau d'altération du contrôle postural sont plus lacunaires.

La fatigue neuromusculaire et le contrôle postural sont deux éléments régulièrement pris en compte en physiothérapie. Ils interviennent dans la prise en charge de nombreux patients, que ce soit lors de la prévention d'un risque de chute ou de blessure, ou encore dans l'amélioration d'un niveau de performance sportive. Cependant, il n'est pas toujours facile pour le clinicien de transférer les savoirs découlant de la recherche fondamentale vers des applications cliniques concrètes en physiothérapie.

1.1 Le contrôle postural

1.1.1 Définition et composants

Le contrôle postural est une fonction complexe qui implique de garder la projection du centre de masse à l'intérieur de la base de sustentation⁽¹⁾. Ainsi le centre de pression (CdP), qui est la résultante des forces dirigées contre le sol d'une personne debout⁽³⁾, et le centre de masse sont liés. En effet, le contrôle postural est la recherche constante de l'alignement de ces deux forces, ce qui assure le maintien de la posture⁽⁴⁾.

D'après *Shumway-Cook & Woollacott*⁽⁵⁾, le contrôle postural nécessite l'intégration des nombreuses afférences provenant de trois principaux systèmes sensoriels: les systèmes visuel, somatosensoriel et vestibulaire. Cependant, d'autres facteurs comme les contraintes biomécaniques, les stratégies de mouvements ou encore les processus cognitifs liés à l'attention et aux expériences antérieures influencent également le contrôle postural⁽⁶⁾. Cela démontre bien la pluralité et la complexité des mécanismes assurant sa régulation.

1.1.2 Moyens d'évaluation

Le contrôle postural peut être évalué grâce à la plateforme de stabilométrie⁽⁷⁾. Il s'agit d'une plateforme de force permettant l'observation de plusieurs variables du mouvement du CdP, comme son déplacement sur l'axe antéro-postérieur ou médio-latéral, sa vitesse, sa longueur ou encore sa surface de déplacement⁽¹⁾. Ces renseignements permettent d'évaluer l'efficacité du contrôle postural, ainsi que son degré de perturbation lors d'une intervention externe ou dans des conditions particulières (privation d'afférences visuelles, fatigue neuromusculaire, hypoxie, pathologies, etc.)^(1, 8, 9, 10). Cet outil est reproductible, fiable et valide^(7, 11), bien que ses qualités métrologiques soient en partie dépendantes du protocole de test stabilométrique utilisé⁽⁷⁾.

1.2 La fatigue neuromusculaire

1.2.1 Définition et composants

La fatigue neuromusculaire correspond à une diminution de la capacité d'un muscle à produire une force ou une puissance donnée suite à un exercice⁽¹²⁾. Deux types de fatigue sont distinguables: la fatigue d'origine centrale et celle d'origine périphérique.

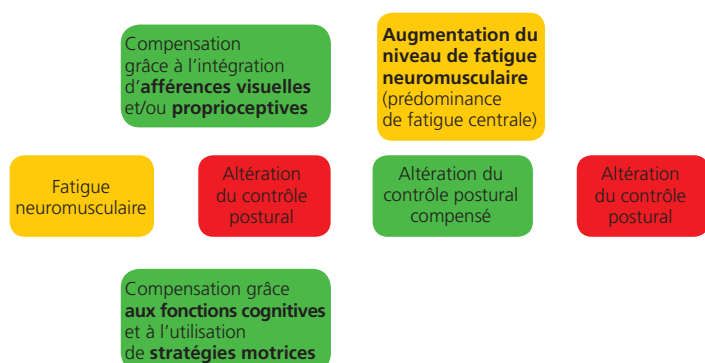
La fatigue centrale se définit par « une baisse de l'activation volontaire (i.e. nombre et/ou fréquence de décharges des unités motrices recrutées à l'origine de la production d'une force musculaire) du muscle »⁽¹³⁾. La fatigue périphérique est, quant à elle, caractérisée par « une baisse de la force contractile des fibres musculaires et des mécanismes de transmission des potentiels d'action musculaire »⁽¹³⁾. Ainsi la fatigue centrale et la fatigue périphérique sont impactées par des modifications du fonctionnement des systèmes se trouvant respectivement en amont et en aval de la jonction neuromusculaire⁽¹⁴⁾.

1.2.2 Moyens d'évaluation

La fatigue neuromusculaire est quantifiable au moyen de neurostimulations électriques transcutanées (non-invasives) appliquées sur le nerf moteur d'un muscle au repos ou lors de contractions maximales isométriques volontaires (CMV)^(13, 15). Pour évaluer la fatigue centrale, il faut d'abord enregistrer le niveau de force obtenu par une CMV. Ensuite, une neurostimulation électrique est surimposée à cette CMV et un nouveau pic de force est obtenu. L'écart entre les niveaux de force de la CMV et du pic de force de la neurostimulation surimposée constitue l'incapacité du sujet à recruter toutes ses unités motrices et est égal à son activation maximale volontaire (AMV). La diminution de l'AMV suite à un exercice correspond au niveau de fatigue centrale⁽¹³⁾. Pour évaluer la fatigue périphérique, une neurostimulation électrique est appliquée sur le muscle au repos afin d'obtenir une secousse musculaire. Ce pic de force peut être évalué avant, durant ou après une tâche fatigante. Une réduction de l'amplitude de la secousse musculaire, et donc de la capacité du muscle à se contracter suite à une neurostimulation électrique, va permettre de quantifier la fatigue périphérique⁽¹³⁾.

1.3 Les liens entre la fatigue neuromusculaire et le contrôle postural statique

La diminution du contrôle postural serait due à des perturbations et altérations des récepteurs sensoriels et de la commande motrice⁽¹⁾. Dans un premier temps, le système nerveux central parviendrait à compenser ces altérations par l'intégration de différentes informations sensorielles⁽¹⁾. Mais lorsque les atteintes sont trop grandes et que les facteurs centraux sont touchés, la stratégie compensatoire n'est plus efficace et le contrôle postural est péjoré (figure 1).



› Figure 1: Détérioration du contrôle postural lors d'un exercice musculaire général engendrant une fatigue neuromusculaire (adapté de Paillard, 2012)⁽¹⁾.

Il existe deux façons d'induire une fatigue neuromusculaire impactant le contrôle postural : par une tâche fatigante globale (e.g. course à pied, ski de fond), ou alors au moyen d'un exercice focalisé sur un groupe musculaire particulier⁽¹⁾. Les muscles fléchisseurs plantaires jouent un rôle très important dans le maintien de l'équilibre postural, principalement dans le plan sagittal⁽¹⁶⁾. De ce fait, de nombreuses études induisent une fatigue au niveau du triceps sural afin d'observer l'impact de la fatigue neuromusculaire sur le contrôle postural^(17, 18, 19, 20).

Malgré une quantité importante de recherches s'intéressant à l'impact de la fatigue neuromusculaire sur le contrôle postural, à notre connaissance, une seule d'entre elles quantifie le niveau de fatigue induite et explique l'origine de cette fatigue. Il s'agit de *Boyas et al.*⁽¹⁹⁾ qui ont, au cours d'une même étude, quantifié le type et le niveau de fatigue neuromusculaire ainsi que la dégradation du contrôle postural suite à des contractions musculaires isométriques des muscles fléchisseurs plantaires. Ils ont remarqué que la prédominance d'un type de fatigue semble être en lien avec l'intensité de la tâche fatigante. En l'occurrence, faire un effort à une intensité faible (25% de la CMV) favoriserait l'apparition d'une fatigue centrale, tandis qu'à des intensités plus élevées (50% et 75% de la CMV), ces efforts développeraient majoritairement une fatigue périphérique. Néanmoins, ces trois variantes d'intensité d'effort ont engendré des altérations posturales similaires. Ce dernier résultat s'oppose à ceux obtenus par *Harkins et al.*⁽²¹⁾ qui, lors d'une tâche isocinétique imposée simultanément aux muscles fléchisseurs plantaires et fléchisseurs dorsaux de la cheville, ont pu constater un niveau de fatigue corrélé au niveau d'altération du contrôle postural. Par contre, ils n'ont pas cherché à distinguer si, dans ce cas, un type de fatigue était plus responsable de l'altération du contrôle postural.

Ainsi, ces résultats tendent à confirmer le lien entre la fatigue neuromusculaire et l'altération du contrôle. Cependant, ils ne permettent pas de préciser la nature exacte de ce lien, et notamment s'il existe une corrélation directe entre le niveau et/ou le type de fatigue neuromusculaire et le niveau d'altération du contrôle postural.

1.4 Objectifs

Les objectifs de ce travail se situaient à deux niveaux. Il s'agissait en premier lieu de montrer s'il existe une relation « dose-réponse » entre le niveau de fatigue neuromusculaire et l'altération du contrôle postural afin de pouvoir comprendre si le niveau d'altération du contrôle postural est corrélé à la quantité de fatigue neuromusculaire des muscles fléchisseurs plantaires, et si un type de fatigue (centrale ou périphérique) est plus impliqué dans ce processus.

Dans un deuxième temps, il visait à transférer les connaissances fondamentales obtenues par l'expérimentation vers des implications cliniques concrètes en physiothérapie.

2. Méthode

Pour l'étude expérimentale de cohorte sans groupe contrôle, 10 hommes (âge : 26 ± 3 ans ; taille : 180 ± 7 cm ; poids : 76 ± 7 kg) ont été sélectionnés selon des critères prédéfinis (tableau 1).

Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
Être âgé de 18 à 35 ans	Faire du sport d'élite
Être en bonne santé (évaluée par questionnaire adapté du Q-AAP).	Avoir actuellement une blessure ou une instabilité anormale au niveau des membres inférieurs.
Pratiquer une activité physique régulière (selon les critères définis par l'OMS).	

› Tableau 1: Critères d'inclusion et d'exclusion.

Le recrutement a principalement eu lieu sur le campus de l'université de Lausanne et les participants ont dû signer un formulaire de consentement. Lors de cette étude, ils ont réalisé une tâche fatigante imposée aux muscles fléchisseurs plantaires. Au cours de cet exercice, des mesures ont été prises afin d'évaluer la cinétique (i) d'altération du contrôle postural, (ii) du développement de la fatigue centrale et (iii) du développement de la fatigue périphérique.

2.1 Protocole de test

Le protocole impliquait 2 séances de tests avec un intervalle d'environ 10 jours entre les deux. La première séance a servi à évaluer la cinétique de développement de la fatigue neuromusculaire, et la seconde à enregistrer la cinétique d'altération du contrôle postural (figure 2). L'ordre de passation des séances a été randomisé. La tâche fatigante comprenait huit séries de 30 secondes de flexions plantaires en station bipodale les talons dans le vide sur une marche de 30 cm de hauteur, entrecoupées de 90 secondes de pause ou de tests (fatigue neuromusculaire ou contrôle postural). La dernière série était continué jusqu'à l'épuisement et l'impossibilité pour le sujet de continuer à réaliser des flexions plantaires. Ce protocole a permis de prendre des mesures régulières au cours de la tâche fatigante et ainsi

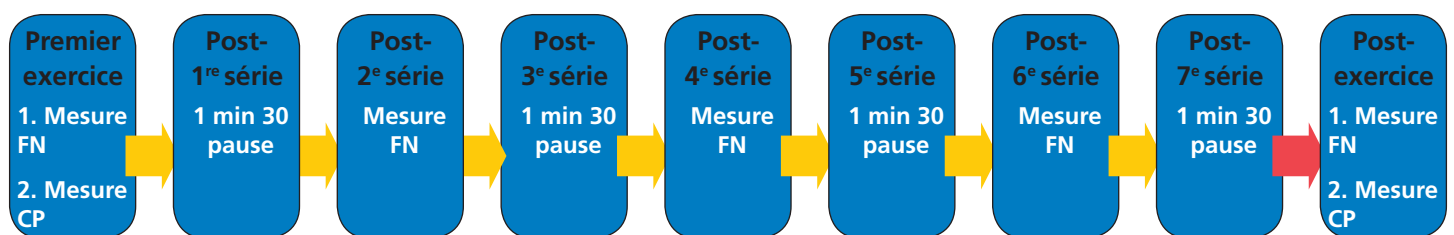
de pouvoir chercher la présence d'une relation « dose-réponse » entre la fatigue neuromusculaire et l'altération du contrôle postural.

2.2 Mesures de force neuromusculaire

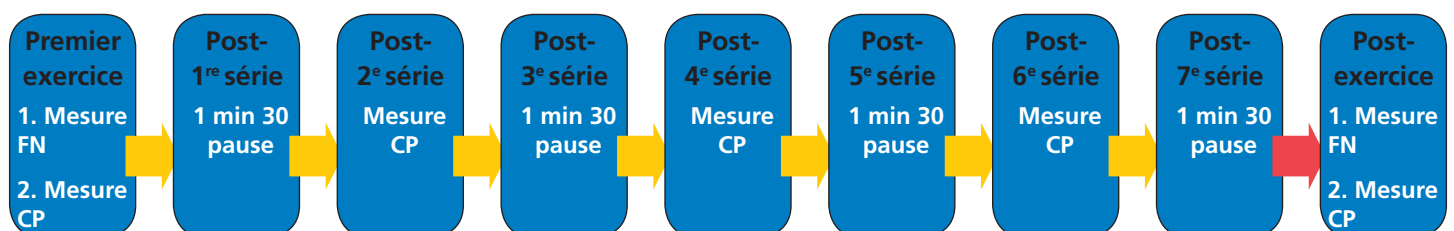
Les mesures de force neuromusculaire des muscles fléchisseurs plantaires (tableau 2 et figure 3) ont été réalisées à l'aide d'une pédale artisanale munie de capteurs à jauges d'extensométrie (Vishay Micro Measure, USA) montée en pont de Wheatstone (deux ensembles de jauges perpendiculaires). Les sujets étaient assis sans appui pour le dos, les bras croisés sur la poitrine. Les hanches, les genoux et la cheville se trouvaient à 90° de flexion. Le pied était attaché dans l'ergomètre et le genou bloqué afin d'éviter que le talon puisse se soulever (figure 4). Seule la jambe dominante a été testée (déterminée au moyen du Waterloo Footedness Questionnaire revised by Elias⁽²²⁾).

Les stimulations transcutanées ont été induites par un stimulateur (voltage maximum de 400 volts) à courant constant (modèle DS7AH, Digitimer, Hertfordshire, UK). L'anode était disposée sur la base inférieure des muscles quadriceps (électrode rectangulaire de 10 x 5 cm, Compex, Ecublens, Suisse) et la cathode (électrode EMG de type Kendall Meditrace 100,

Mesure de la cinétique de développement de la fatigue neuromusculaire



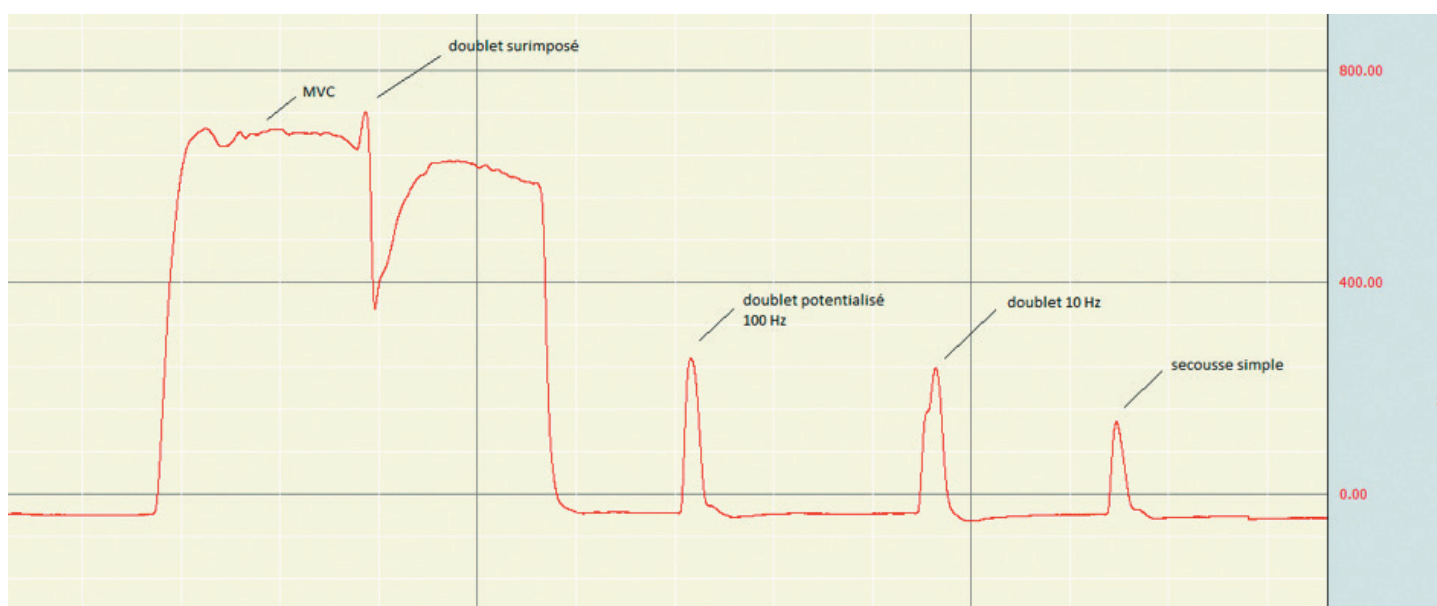
Mesure de la cinétique d'altération du contrôle postural



› Figure 2: Design des séances de tests. Mesure de la cinétique de développement de la fatigue neuromusculaire (FN); Mesure de la cinétique d'altération du contrôle postural (CP). Tâche fatigante (→) = 30 secondes de flexions plantaires; Tâche fatigante jusqu'à épuisement (→) = flexions plantaires jusqu'à épuisement.

CMV	mesurer la force maximale volontaire du sujet
CMV + doublet 100Hz surimposé	mesurer le niveau d'activation maximale volontaire du sujet (AMV) et ainsi comprendre l'influence des processus nerveux dans la fatigue ➔ fatigue centrale .
Doublet 100Hz au repos	mesurer la capacité du muscle à répondre à un influx nerveux (haute fréquence) ➔ fatigue périphérique .
Doublet 10Hz au repos	mesurer la capacité du muscle à répondre à un influx nerveux (basse fréquence). La mise en rapport du doublet 100Hz avec celui à 10Hz par le ratio 10Hz/100Hz nous permettra de distinguer des différences entre ces deux processus ➔ fatigue périphérique .
Secousse simple	mesurer les propriétés de l'onde M des muscles fléchisseurs plantaires et ainsi vérifier s'il existe des modifications de l' excitabilité musculaire (résultats non-présentés dans cet article).

› Tableau 2: Méthodes et niveaux d'évaluation de la fatigue neuromusculaire (CMV=contraction maximale volontaire).



› Figure 3: Exemple d'une courbe de force soumise au protocole servant à évaluer la fatigue neuromusculaire (MVC=contraction maximale volontaire, N=newton).

Tyco, Canada) était positionnée sur le nerf tibial au niveau du creux poplité. Ces électrodes ont permis l'envoi de stimulations électriques d'une durée de 1 ms lors de CMV ou sur le muscle au repos. Comme expliqué précédemment (cf. chapitre 1.2.2), cette méthode permet d'évaluer le niveau de fatigue neuromusculaire en distinguant la fatigue centrale de la fatigue périphérique⁽¹³⁾.

2.3 Mesures du contrôle postural

Le contrôle postural a été évalué au moyen de la plateforme de force Win-posturo (Médicapteurs, Balma, France) grâce à l'analyse des déplacements du CdP. La surface (mm²), la longueur (mm) et la vitesse moyenne (mm/s) de déplacement du CdP ont été enregistrées. Le paramètre longueur en fonction de la surface (LFS), marqueur de la dépense énergétique⁽²³⁾, a également été calculé.

Les sujets devaient se tenir debout sur la plateforme, les pieds placés sur des marqueurs précis (5 cm d'écartement entre les talons, les pieds formant un angle de 30°). Les jambes étaient tendues et les bras maintenus le long du corps. Le test était effectué avec les yeux ouverts, le regard dirigé vers un mur blanc placé à 2,50 mètres. La durée du test était de 51,2 secondes et



› Figure 4: Positionnement du sujet sur l'ergomètre isométrique

la fréquence d'acquisition de la plateforme était de 40 Hz, ce qui a permis d'obtenir une mesure du déplacement du CdP en 2048 points⁽²⁴⁾.

2.4 Statistiques

L'analyse statistique des données obtenues a été menée avec le programme SigmaPlot (version 11.0, Systat, Chicago, IL). Des analyses de variance (ANOVA) à une voie à mesures répétées au niveau des différentes variables dépendantes ont été effectuées. Des ANOVA à deux voies à mesures répétées (temps [pre-post] x session [neurostimulation-posture]) ont été réalisées afin de vérifier qu'il n'y avait pas de différence entre la séance neurostimulation et la séance posture. Le taux de significativité a été placé à $P < 0.05$. Le test post-hoc Tukey a été utilisé afin de révéler le niveau de significativité des paires de moyennes obtenues. Aucune correction de l'alpha pour comparaisons multiples n'a été réalisée. De plus, des tests de corrélation de Pearson (r) ont été effectués entre les différentes variables de fonction neuromusculaire et du contrôle postural.

3. Résultats

Pour les valeurs de force neuromusculaire (tableau 3), des diminutions statistiquement significatives ($p < 0.05$) ont été obtenues entre la condition pre-exercice et les conditions post-4^e

série, post-6^e série et post-exercice pour les CMV, les doublets 100 Hz et le ratio 10 Hz/100 Hz (déjà dès post-2^e série). Pour les AMV, cette différence significative ($p < 0.05$) n'est présente qu'en condition post-6^e série.

Pour les valeurs du contrôle postural (tableau 3), des augmentations significatives ($p < 0.05$) ont été obtenues entre la condition pre-exercice et les conditions post-4^e série, post-6^e série et post-exercice pour la vitesse de déplacement du CdP, la longueur de déplacement du CdP et le rapport LFS. Pour la surface de déplacement du CdP, cette différence significative ($p < 0.05$) n'est présente qu'en condition post-6^e série.

Des corrélations significatives sont présentes entre la diminution de l'AMV et la baisse de force des CMV entre la condition pre-exercice et les conditions post-6^e série ($r = 0.87$, $P < 0.001$) et post-exercice ($r = 0.82$, $P < 0.05$). Aucune autre corrélation significative n'a pu être observée entre les autres variables enregistrées.

4. Discussion

4.1 Fatigue neuromusculaire

Une corrélation statistiquement significative existe entre la baisse de force lors de CMV et la baisse de l'AMV, soutenant

Paramètres observés	Pré-exercice	Post-2 ^e série	Post-4 ^e série	Post-6 ^e série	Post-exercice
Fatigue neuromusculaire					
CMV (N)	1009 ± 290	848 ± 299	787 ± 241 *	748 ± 251 *	696 ± 258 *
Fatigue centrale					
AMV (% AMV maximale)	87.6 ± 13.2	79.3 ± 16.5	77.3 ± 20.6	75.3 ± 19.8 *	76 ± 22.6
Fatigue périphérique					
Doublet 100 Hz (N)	383 ± 78	368 ± 70	327 ± 45 *	311 ± 48 *	275 ± 53 *
Ratio 10 Hz/ 100Hz	0.98 ± 0.07	0.91 ± 0.08 *	0.87 ± 0.06 *	0.85 ± 0.1 *	0.8 ± 0.07 *
Contrôle postural					
Vitesse moyenne de déplacement du CdP (mm/s)	9.97 ± 2.71	10.8 ± 2.59	12.5 ± 3.97 *	12.9 ± 3.81 *	12.5 ± 3.2 *
Surface de déplacement du CdP (mm)	124 ± 69	184 ± 100	271 ± 204	332 ± 301 *	180 ± 116
Longueur de déplacement du CdP (mm)	459 ± 139	553 ± 133	642 ± 203 *	662 ± 195 *	641 ± 164 *
LFS	1.04 ± 0.29	1.2 ± 0.25	1.28 ± 0.27 *	1.27 ± 0.27 *	1.39 ± 0.32 *

› Tableau 3: Valeurs (moyenne ± écart-type) de fatigue neuromusculaire et de contrôle postural avant (pre-exercice), pendant (post-n séries) et après (post-exercice) la tâche fatigante. *Différence statistiquement significative de la condition pre-exercice, $P < 0.05$. (CMV=contraction maximale volontaire, AMV=activation maximale volontaire, CdP=centre de pression, LFS=longueur en fonction de la surface, N=Newton, mm=milimètre, s=seconde).

ainsi le lien entre la fatigue centrale et la production de force lors de CMV. Ce lien est soutenu par certains auteurs^(25, 26) mais s'oppose à d'autres études n'ayant pas trouvé de corrélations significatives entre la fatigue (diminution de la force) et la baisse de l'AMV⁽²⁷⁾. Cela peut s'expliquer par le fait que le type de fatigue semble dépendre des caractéristiques de la tâche effectuée (type de contractions, durée de la tâche). C'est ce qu'Enoka et Stuart⁽²⁸⁾ ont baptisé la « task dependency » de la fatigue. De plus, certains muscles sont plus associés à un type de fatigue. Ainsi, les muscles fléchisseurs plantaires développent majoritairement une fatigue centrale^(26, 29), ce qui explique également la corrélation obtenue.

La diminution du doublet 100 Hz et du ratio 10/100 Hz met également en évidence la présence d'une fatigue périphérique. Cette dernière pourrait se développer de façon préférentielle lors d'un exercice où le muscle passe par des phases d'allongement complet (ce qui est le cas de la tâche fatigante imposée dans cette étude) et travaille donc dans un régime excentrique⁽³⁰⁾. Cela a pour effet d'endommager les sarcomères se trouvant au milieu de la fibre musculaire, et de réduire sa capacité contractile⁽³¹⁾. Cependant, aucune corrélation entre des marqueurs périphériques et la baisse de force des CMV n'a pu être établie.

4.2 Contrôle postural

Comme attendu, le protocole fatigant induit des changements significatifs sur tous les paramètres observés, à savoir la surface de déplacement du CdP, sa longueur de déplacement, sa vitesse moyenne et le facteur LFS. La cinétique de perturbation du contrôle postural est par contre plus étonnante. En effet une tendance vers une amélioration du contrôle postural est constatée en post-effort comparativement à la condition post-6^e série pour les paramètres surface, longueur et vitesse moyenne de déplacement du CdP (tableau 3). Comment comprendre cette amélioration du contrôle postural en fin d'exercice ? L'ordre de passage des tests en post-effort implique qu'après la 8^e et dernière série, les sujets pratiquent d'abord les tests servant à évaluer la fatigue neuromusculaire (CMV + neurostimulations), avant de passer ensuite le test de posturographie. Cela implique un intervalle d'environ 1min45 entre la fin de la dernière série de flexions plantaires et le passage sur la plateforme de stabilométrie. Ce temps pourrait déjà être suffisant pour amener une récupération du contrôle postural. En effet, d'autres chercheurs^(19, 21) ont investigué la récupération du contrôle postural et leurs résultats se rapprochent de ceux présentés ici. Ils ont également observé que 2 minutes après la fin d'une tâche fatigante imposée aux muscles fléchisseurs plantaires, le contrôle postural était déjà de retour à des valeurs proches de celles enregistrées avant l'exercice. Ainsi, afin de ne pas obtenir des résultats qui sous-estiment le niveau d'altération du contrôle postural, il est important d'évaluer celui-ci le plus rapidement après l'arrêt de l'exercice fatigant.

4.3 Les liens entre la fatigue neuromusculaire et le contrôle postural

Le protocole fatigant a engendré à la fois une fatigue centrale et une fatigue périphérique. Cette fatigue neuromusculaire a impacté le contrôle postural puisque plusieurs variables de pos-

turographie se sont détériorées au cours du test. En revanche, aucune corrélation statistiquement significative n'a été trouvée entre le niveau de fatigue neuromusculaire et le niveau d'altération du contrôle postural. Il ne semble donc pas exister une relation « dose-réponse » entre ces deux variables pour ce type de tâche fatigante. Ainsi, ce ne sont pas les personnes avec le niveau de fatigue neuromusculaire le plus élevé qui sont forcément les moins stables. Le niveau de fatigue neuromusculaire pourrait donc ne pas être un bon prédicteur du contrôle postural. Cela peut s'expliquer par la multitude de mécanismes intervenant dans le contrôle postural et par le fait que les effets de fatigue neuromusculaire peuvent être compensés pendant un certain temps par l'intégration d'informations sensorimotrices supplémentaires⁽¹⁾ (figure 1).

Cette étude ne permet pas non plus d'affirmer que le contrôle postural soit plus influencé par la fatigue centrale ou la fatigue périphérique. Cependant l'observation de la cinétique de développement de la fatigue centrale et de la dégradation du contrôle postural tend à rapprocher ces 2 paramètres. En effet le niveau de fatigue centrale diminue légèrement en post-exercice (comparé à la condition post-6^e série), tout comme les valeurs de posture enregistrées en condition post-exercice tendent vers une amélioration du contrôle postural (comparé à la condition post-6^e série). Deux hypothèses complémentaires paraissent pouvoir argumenter ce lien, bien qu'il ne soit pas statistiquement significatif. Premièrement, plusieurs recherches affirment que le contrôle postural serait plus impacté par la fatigue centrale^(1, 32), et cette tendance se retrouve dans notre étude. Selon le principe de la « task dependency »⁽²⁸⁾, un exercice de durée longue⁽³²⁾ et avec des contractions continues⁽³³⁾ favoriserait le développement de la fatigue centrale. Notre tâche diffère donc et ne favorise pas spécifiquement le développement de ce type de fatigue. Deuxièmement, la récupération au niveau central serait un processus rapide^(34, 35). Comme dit précédemment, le protocole de test dans notre étude en condition post-exercice implique une pause d'environ 1min45 entre la fin de la tâche fatigante et l'examen de la posture (temps nécessaire pour passer les tests neuromusculaires). Ce temps pourrait déjà être suffisant pour induire une récupération partielle des facteurs centraux et ainsi permettre un retour vers un meilleur contrôle postural. Cela confirmerait également l'hypothèse que le contrôle postural est une tâche plus en lien avec les facteurs centraux que les facteurs périphériques.

4.4 Implications pratiques en physiothérapie

Trois pistes d'application paraissent ressortir de ces résultats pour la prise en charge en physiothérapie :

1. La fatigue altère le contrôle postural.
2. Le niveau d'altération du contrôle postural ne semble pas corrélé au niveau de fatigue neuromusculaire.
3. La récupération au niveau du contrôle postural est un phénomène très rapide (< 2min).

A travers une liste non-exhaustive d'applications cliniques en physiothérapie, nous allons voir comment ces informations et l'analyse du contrôle postural peuvent améliorer la prise en charge de certains types de patients auxquels le physiothérapeute peut être confronté.

4.4.1 Intérêt de la stabilométrie en post-effort chez le sujet âgé

Il est admis que le contrôle postural se péjore avec l'âge, notamment à cause du phénomène de sarcopénie et du déclin des fonctions sensori-motrices⁽³⁶⁾. Il est également reconnu qu'un même niveau de fatigue neuromusculaire altère de façon plus marquée le contrôle postural d'une personne âgée que celui d'une personne jeune^(36, 37, 38). Ainsi le risque de chute se trouve donc potentiellement augmenté par la fatigue neuromusculaire chez les sujets âgés, et ces chutes sont un enjeu de santé publique avec des coûts socioéconomiques à hauteur de 6.8 milliards de francs par année en Suisse⁽³⁹⁾. Les plateformes de stabilométrie sont des outils validés pour détecter un risque de chute chez la personne âgée^(40, 41, 42), et le paramètre qui semble le plus lié au risque de chute est la vitesse de déplacement du CdP sur l'axe antéro-postérieur, une vitesse élevée étant le signe d'un risque important^(40, 41). Dans notre étude, alors même que les participants sont jeunes, il est intéressant de rappeler que la vitesse moyenne de déplacement du CdP augmente déjà de façon significative dès la condition post-4^e série (+42.8 ± 35.9 %).

Les tests peuvent être faits au repos, mais aussi en condition post-effort, ceci permettant de détecter des personnes dont le contrôle postural est déficient uniquement en condition de fatigue neuromusculaire, et présentant donc un risque de chute marqué à l'effort⁽⁴³⁾. Le physiothérapeute peut ensuite mettre en place un traitement adapté. En effet, l'exercice en général ainsi que l'entraînement de l'équilibre au moyen d'exercices spécifiques permet de diminuer le risque de chute chez le sujet âgé⁽⁴⁴⁾. L'impact du physiothérapeute est donc important à la fois au moment du dépistage du risque de chute, de même que pour suivre l'évolution des capacités d'équilibration des patients âgés suite à la thérapie.

4.4.2 Intérêt de la stabilométrie en post-effort chez le sportif

Des études ont démontré que le contrôle postural était supérieur chez des sportifs d'élite comparés à des sportifs amateurs^(8, 45) et qu'il pouvait influencer la performance sportive⁽⁴⁶⁾. *Vuillerme et al.*⁽⁸⁾ ont observé que des gymnastes experts avaient un meilleur contrôle postural avec les yeux fermés que des athlètes experts dans d'autres sports, mettant en évidence une meilleure capacité à compenser une altération des afférences visuelles par les autres systèmes participant au maintien de l'équilibre postural. Cette dimension multi-systémique du contrôle postural explique également le fait qu'une corrélation directe entre le contrôle postural et la fatigue neuromusculaire n'ait pas été démontrée.

Ainsi, en comparant les résultats posturographiques d'un même sujet en condition pré-effort et post-effort, les physiothérapeutes obtiennent des informations sur sa capacité à compenser les effets de la fatigue neuromusculaire sur son contrôle postural par les autres systèmes participant au maintien de l'équilibre. Ils peuvent alors adapter leur traitement et leurs exercices en fonction des besoins des sujets, et également en fonction de l'emphase mise sur les différents systèmes qui régissent le contrôle postural.

4.4.3 Intérêt de la stabilométrie en prévention des blessures

Le contrôle postural est en lien avec le risque de blessure du membre inférieur lors d'une activité sportive^(47, 48). Une étude menée sur des basketteurs adolescents a démontré que, en condition unipodale, de grandes variations de déplacement du CdP sur les axes antéro-postérieur et médio-latéral étaient corrélées à une prévalence plus importante de blessure à la cheville⁽⁴⁹⁾. Les mesures stabilométriques permettraient donc de déterminer quelles sont les personnes à risque d'avoir une entorse de cheville. Pour une meilleure interprétation, il est notamment recommandé de combiner la posturographie avec d'autres tests comme le Star Excursion Balance Test⁽⁵⁰⁾.

Un autre type de lésion courante a également un lien avec la régulation du contrôle postural : la rupture du ligament croisé antérieur (LCA). En effet, des tests stabilométriques réalisés chez des sujets ayant eu une rupture du LCA non-opérée ont démontré, par rapport à un groupe contrôle sans lésion du LCA, une altération du contrôle postural en condition unipodale sur la jambe lésée, mais également sur la jambe saine⁽⁵¹⁾.

Avec les plateformes de posturographie, le physiothérapeute a donc à disposition des outils lui apportant des informations précieuses sur un risque de blessure du membre inférieur chez un sujet. Il peut comparer les mesures en condition pré-effort et post-effort afin de voir si la fatigue neuromusculaire représente un risque accru de blessure chez le patient. Cela lui donne également l'opportunité de vérifier la progression d'un sujet à la suite d'un entraînement, et donc d'obtenir des renseignements sur son efficacité thérapeutique. Enfin, il peut également récolter des données qui, associées à d'autres critères de retour au sport, lui permettront de diminuer les risques de récurrence de blessure.

4.4.4 Importance du protocole de test stabilométrique en condition post-effort

L'utilisation de la stabilométrie en post-fatigue implique une attention particulière portée au protocole de test. En effet, cette recherche a démontré que la récupération au niveau du contrôle postural peut être un phénomène très rapide qui prendrait <2min. Ce résultat confirme les apports d'autres études récentes^(19, 21, 52). Ainsi, lors de l'utilisation de la stabilométrie en post-effort, les physiothérapeutes doivent être attentifs au temps qui s'écoule entre la fin de la tâche fatigante et le début des mesures. Les tests posturographiques doivent débuter le plus rapidement possible après la fin de l'exercice fatigant afin de ne pas obtenir de valeurs qui sous-estiment l'influence de la fatigue neuromusculaire sur le contrôle postural. Le physiothérapeute doit donc préparer son matériel et organiser son espace de façon à être le plus efficient possible.

4.5 Limites

Premièrement, les participants à l'étude n'ont pas eu de séance de familiarisation avec les techniques d'évaluation de la fatigue neuromusculaire et du contrôle postural, ce qui pourrait avoir un impact sur les résultats⁽⁵³⁾.

Ensuite, la généralisation des résultats n'est pas assurée car l'étude ne comprend que des hommes (18-35 ans). Le relativement faible nombre de participants à l'étude ainsi que la grande variabilité des données récoltées inter-sujets doivent être également pris en compte à la lecture des résultats.

Enfin, la liste des implications cliniques en physiothérapie n'est bien évidemment pas exhaustive. Les exemples proposés servent à proposer des pistes de transfert de connaissances scientifiques vers la pratique clinique en physiothérapie.

5. Conclusion

Malgré le fait que la tâche fatigante ait engendré une fatigue neuromusculaire et une diminution du contrôle postural, aucune corrélation significative n'a pu être établie entre le niveau de fatigue central ou périphérique des muscles fléchisseurs plantaires et le niveau d'altération du contrôle postural. Cette étude n'a donc pas démontré de relation « dose-réponse » entre ces deux variables. De plus, il est impossible d'affirmer que le contrôle postural soit principalement corrélé à un type de fatigue neuromusculaire spécifique, bien que le lien avec la fatigue centrale semble plus marqué. En revanche, elle a confirmé le fait que la récupération au niveau du contrôle postural est un phénomène très rapide (<2min). Elle a également permis de montrer des implications cliniques en physiothérapie, notamment concernant l'amélioration de la prise en charge dans 3 situations courantes en physiothérapie: le risque de chute chez la personne âgée, l'amélioration de la performance sportive et la rééducation des blessures du membre inférieur (entorse cheville et LCA).

Enfin, dans l'optique de recherches futures, il serait intéressant pour les physiothérapeutes d'avoir des preuves scientifiques de l'intérêt ou non de travailler plus particulièrement les capacités d'équilibration en condition post-effort.

Implications pour la pratique

- Le niveau de fatigue neuromusculaire ne semble pas être corrélé au niveau d'altération du contrôle postural.
- La récupération au niveau du contrôle postural est un phénomène très rapide (< 2min).
- L'analyse du contrôle postural en post-fatigue permet d'améliorer la prise en charge dans les cas de risques de chute chez la personne âgée, du suivi de la performance d'un sportif ou encore dans la prévention et la rééducation de blessures du membre inférieur.

Contact

Nicolas Mamie, Rue de l'Orée 40, 2000 Neuchâtel,
nicolas.mamie@yahoo.fr

Références

1. Paillard T. Effects of general and local fatigue on postural control: a review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2012; 36: 162-176.
2. Paillard T. Relationship between muscle function, muscle typology and postural performance according to different postural conditions in young and older adults. *Frontiers in Physiology*. 2017; 8: 585
3. Zemkova E. Assessment of balance in sports: science and reality. *Serbian Journal of Sports Sciences*. 2011; 5(4): 127-139.
4. Paillard T. *Posture et équilibration humaines*. Paris: De Boeck Supérieur; 2016.
5. Shumway-Cook A, Woollacott MH. *Motor control: translating research into clinical practice*. Third edition. Philadelphia, USA: Lippincott Williams & Wilkins: 2007.
6. Horak FB. Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age and Ageing*. 2006; 35 (S2): ii7-ii11.
7. Ruhe A, Fejer R, Walker B. The test-retest reliability of centre of pressure measures in bipedal static task conditions – a systematic review of the literature. *Gait and Posture*. 2010; 32: 436-445.
8. Vuillerme N, Danion F, Marin L, Boyadjian A, Prieur JM, Weise I, Nougier V. The effect of expertise in gymnastics on postural control. *Neurosciences Letters*. 2001; 303(2): 83-86.
9. Degache F, Larghi G, Faiss R, Deriaz O, Millet G. Hypobaric versus normobaric hypoxia: same effects on postural stability? *High Altitude Medicine & Biology*. 2012; 13(1): 40-5.
10. Degache F, Goy Y, Vat S, Haba Rubio J, Contal O, Heinzer R. Sleep-disordered breathing and daytime postural stability. *Thorax*. 2016; 71(6): 543-8.
11. Baldini A, Nota A, Assi V, Ballanti F, Cozza P. Intersession reliability of a posturo-stabilometric test, using a force platform. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2013; 23(6): 1474-1479.
12. Bigland-Ritchie B, Woods JJ. Changes in muscle contractile properties and neural control during human muscular fatigue. *Muscle Nerve*. 1984; 7: 691-699.
13. Boyas S, Guével A. Neuromuscular fatigue in healthy muscle: Underlying factors and adaptation mechanisms. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2011; 54: 88-108.
14. Millet G, Bachasson D, Temesi J, Wuyam B, Féasson L, Vergès S, Lévy P. Potential interests and limits of magnetic and electrical stimulation techniques to assess neuromuscular fatigue. *Neuromuscular Disorders*. 2012; 22: 181-186.
15. Kent-Braun J. Central and peripheral contributions to muscle fatigue in humans during sustained maximal effort. *European Journal of Applied Physiology*. 1999; 80:57-63.
16. Gimmon Y, Riemer R, Oddsson L, Melzer I. The effect of plantar flexor muscle fatigue on postural control. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2011; 21: 922-928.
17. Corbeil P, Blouin JS, Bégin F, Nougier V, Teasdale N. Perturbation of the postural control system induced by muscular fatigue. *Gait and posture*. 2003; 18: 92-100.
18. Hlavackova P, Pradon D, Vuillerme N. Control of bipedal posture following localised muscle fatigue of the plantar-flexors and finger-flexors. *European Journal of Applied Physiology*. 2012; 112: 789-793.
19. Boyas S, Remaud A, Rivers E, Bilodeau M. Fatiguing exercise intensity influences the relationship between parameters reflecting neuromuscular function and postural control variables. *PLoS ONE*. 2013; 8(8): e72482.
20. Bisson EJ, Lajoie Y, Bilodeau M. The influence of age and surface compliance on changes in postural control and attention due to ankle neuromuscular fatigue. *Experimental Brain Research*. 2014; 232: 837-845.
21. Harkins K, Mattacola C, Uhl T, Malone T, McCrory J. Effects of 2 ankle fatigue models on the duration of postural stability dysfunction. *Journal of Athletic Training*. 2005; 40: 191-196.
22. Elias LJ, Bryden MP, Bulman-Fleming MB. Footedness is a better predictor than is handedness of emotional lateralization. *Neuropsychologia*. 1998; 36(1): 37-43.

23. Gagey G, Weber B. Posturologie, régulation et dérèglement de la station debout. Paris: Masson; 1999.
24. Degache F, Van Zaen J, Oehen L, Guex K, Trabucchi P, Millet G. Alterations in postural control during the world's most challenging mountain ultra-marathon. *PLoS ONE*. 2014; 9(1): e84554.
25. Millet G, Martin V, Lattier G, Ballay Y. Mechanisms contributing to knee extensor strength loss after prolonged running exercise. *Journal of Applied Physiology*. 2003; 94: 193-198.
26. Kennedy A, Hug F, Bilodeau M, Sveistrup H, Guével A. Neuromuscular fatigue induced by alternating isometric contractions of the ankle plantar and dorsiflexors. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2011; 21: 471-477.
27. Nordlund M, Thorstensson A, Cresswell A. Central and peripheral contributions to fatigue in relation to level of activation during repeated maximal voluntary isometric plantar flexions. *Journal of Applied Physiology*. 2004; 96: 218-225.
28. Enoka R, Stuart D. Neurobiology of muscle fatigue. *Journal of Applied Physiology*. 1992; 72(5): 1631-1648.
29. Neyroud D, Rüttimann J, Mannion A, Millet G, Maffiuletti N, Kayser B, Place N. Comparison of neuromuscular adjustments associated with sustained isometric contractions of four different muscle groups. *Journal of Applied Physiology*. 2013; 114: 1426-1434.
30. Newham D, Mills K, Quigley B, Edwards R. Pain and fatigue after concentric and eccentric muscle contractions. *Clinical Science*. 1983; 64: 55-62.
31. Jones D. High- and low- frequency fatigue revisited. *Acta Physiologica Scandinavica*. 1996; 156: 265-270.
32. Paillard T, Lizin C, Rousseau M, Cebellan M. Time to task failure influences the postural alteration more than the extent of muscles fatigued. *Gait and Posture*. 2014; 39: 540-546.
33. Bilodeau M. Central fatigue in continuous and intermittent contractions of triceps brachii. *Muscle and Nerve*. 2006; 34: 205-13.
34. Löscher W, Cresswell A, Thorstensson A. Central fatigue during a long-lasting submaximal contraction of the triceps surae. *Experimental Brain Research*. 1996; 108(2): 305-314.
35. Sogaard K, Gandevia S, Todd G, Petersen N, Taylor J. The effect of sustained low-intensity contractions on supraspinal fatigue in human elbow flexor muscles. *Journal of Physiology*. 2006; 573 (2): 511-523.
36. Helbostad JL, Sturnieks DL, Menant J, Delbaere K, Lord SR, Pijnappels M. Consequences of lower extremity and trunk muscle fatigue on balance and functional tasks in older people: a systematic literature review. *BioMed Central Geriatrics*. 2010; 10 (56).
37. Papa EV, Garg H, Dibble LE. Acute effects of muscle fatigue on anticipatory and reactive postural control in older individuals: a systematic review of the evidence. *Journal of Geriatric Physical Therapy*. 2015; 38(1): 40-48.
38. Parreira RB, Amorim CF, Gil AW, Teixeira DC, Bilodeau M, Silva da RA. Effect of trunk extensor fatigue on the postural balance of elderly and young adults during unipedal task. *European Journal of Applied Physiology*. 2013; 113: 1989-1996.
39. Bureau de prévention des accidents et Pro Senectute. Campagne « L'équilibre en marche »: Faits et chiffres [Internet]. Suisse: Bureau de prévention des accidents; 2016 Mar. [updated 2016 Mar; cited 2019 Apr 30]. Available from http://www.equilibre-en-marche.ch/wp-content/uploads/Medien/Zahlen_Fakten_FR.pdf. Howcroft J, Lemaire ED, Kofman J, Mclroy WE. Elderly fall risk prediction using static posturography. *PLoS ONE*. 2017; 12 (2): e0172398
41. Kwok BC, Clark RA, Pua YH. Novel use of the Wii Balance Board to prospectively predict falls in community-dwelling older adults. *Clinical Biomechanics*. 2015; 30: 481-484.
42. Pajala S, Era P, Koskenvuo M, Kaprio J, Törmäkangas T, Rantanen T. Force plateform balance measures as predictors of indoor and outdoor falls in community-dwelling women aged 63-76 years. *Journal of Gerontology: MEDICAL SCIENCES*. 2008; 63A(2): 171-178.
43. Morrison S, Colberg SR, Parson HK., Neumann S, Handel R, Vinik EJ, Paulson J, Vinik AI. Walking-induced fatigue leads to increased falls risk in older adults. *JAMDA*. 2016; 17: 402-409.
44. Sherrington C, Michaleff ZA, Fairhall N, Paul SS, Tiedmann A, Whitney J, Cumming RG, Herbert RD, Close JCT, Lord SR. Exercise to prevent falls in older adults: an updated systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*. 2016; 51: 1749-1757.
45. Paillard T, Noé F, Rivière T, Marion V, Montoya R, Dupui P. Postural performance and strategy in the unipedal stance of soccer players at different levels of competition. *Journal of Athletic Training*. 2006; 41(2): 172-176.
46. Hrysomallis C. Balance ability and athletic performance. *Sports Medicine*. 2011; 41(3): 221-232.
47. Hrysomallis C. Relationship between balance ability, training and sports injury risk. *Sports Medicine*. 2007; 37(6): 547-556.
48. Kilic O, Van Os V, Kemler E, Barendrecht M, Gouttebarge V. The 'Sequence of Prevention' for musculoskeletal injuries among recreational basketballers: a systematic review of the scientific literature. *Phys Sportsmed*. 2018;46(2):197-212.
49. Wang HK, Chen CH, Shiang TY, Jan MH, Lin KH. Risk-factor analysis of high school basketball-player ankle injuries: a prospective controlled cohort study evaluating postural sway, ankle strength, and flexibility. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2006; 87: 821-825.
50. Grassi A, Alexiou K, Amendola A, Moorman CT, Samuelsson K, Ayeni OR, et al. Postural stability deficit could predict ankle sprains: a systematic review. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*. 2018;26(10):3140-55.
51. Negahban H, Mazaheri M, Kingma I, van Dieen JH. A systematic review of postural control during single-leg stance in patients with untreated anterior cruciate ligament injury. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*. 2014;22(7):1491-504.
52. Sadowska D, Krzepota J. Influence of posturographic protocol on postural stability sways during bipedal stance after ankle muscle fatigue. *Perceptual and Motor Skills*. 2016; 123(1): 232-243.
53. Button D, Behm D. The effect of stimulus anticipation on the interpolated twitch technique. *Journal of Sports Science and Medicine*. 2008; 7: 520-524.