

« L'impact sur la stabilité, l'équilibre dynamique et la force des muscles constituant l'arche longitudinale médiale du pied par le renforcement via électrostimulation couplée à des exercices actifs versus renforcement actif : protocole pour une étude clinique »

SARA ISIDORO OLIVEIRA

Étudiante HES – Filière Physiothérapie

ELODIE RANZONI

Étudiante HES – Filière Physiothérapie

JULINAR SHARAIHA

Étudiante HES – Filière Physiothérapie

Directrices de travail de Bachelor :

ALINE REINMANN

SIMONE GAFNER

**TRAVAIL DE BACHELOR DEPOSE ET SOUTENU A GENEVE EN 2020 EN VUE DE
L'OBTENTION D'UN
BACHELOR OF SCIENCE EN PHYSIOTHERAPIE**

Résumé

Contexte

La littérature existante permet de faire un lien entre un affaissement de la voûte plantaire et la survenue d'entorse de cheville. La voûte plantaire est constituée de quatre arches dont l'arche longitudinale médiale (ALM) composée de muscles intrinsèques du pied (MIP) et de muscles extrinsèques du pied (MEP). Une voûte affaissée est induite lorsque l'ALM n'est plus capable de maintenir sa position menant ainsi à des dysfonctions structurelles ou fonctionnelles. Afin de prévenir ces dernières, le renforcement musculaire de l'ALM a prouvé son efficacité. L'électrostimulation semble être une modalité de renforcement prometteuse des MIP mais reste à évaluer l'ajout des MEP au renforcement de ceux-ci. Cette étude permettra d'évaluer l'impact de l'électrostimulation couplée à des exercices actifs comme modalité de renforcement et de la comparer à de l'actif seul sur la stabilité, l'équilibre dynamique et la force de l'ALM.

Méthode/ Design

Cette étude, randomisée contrôlée, inclura 60 sujets, présentant un pied en pronation avec un affaissement de l'arche objectivable au Foot Posture Index (FPI-6). Ils seront répartis dans deux groupes ; un groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs et un groupe actif. Deux bilans seront effectués, pré et post-intervention.

Discussion

Pour les futures recherches, il serait pertinent de réaliser ce protocole sur une population présentant une pathologie en lien avec un affaissement de l'ALM. Ensuite, afin d'évaluer les bénéfices de l'ajout des MEP à un protocole de renforcement, une étude visant à comparer le renforcement des MEP versus MIP/MEP constituant l'ALM pourrait être réalisée.

Mots clés

Arche longitudinale médiale, électrostimulation, renforcement actif, stabilité

Abstract

Background

The existing literature shows a link between a collapsed arch and an occurrence of ankle sprain. The plantar arch consists of four arches including the medial longitudinal arch composed of intrinsic foot muscles and extrinsic foot muscles. A collapsed foot arch is induced when the medial longitudinal arch is no longer able to maintain its position leading to structural or functional dysfunctions. To prevent these, the strengthening of the medial longitudinal arch has proven its effectiveness. Electrostimulation seems to be a promising modality for strengthening the IFM, but the addition of the extrinsic foot muscles remains to be evaluated. The aim of this study is to evaluate the impact of electrostimulation as a strengthening modality and to compare it to active strengthening only on the stability, dynamic balance and strength of the medial longitudinal arch.

Method/ Design

This randomized controlled study will include 60 subjects, presenting a pronation foot with a collapsed arch objectivable to the Foot Posture Index. They will be divided into two groups: an electrostimulation group coupled with active exercises and an active group. Two assessments will be carried out, pre and post-intervention.

Discussion

For future research, it would be relevant to carry out this protocol on a population with a pathology related to a collapsed medial longitudinal arch. Then, to evaluate the benefits of adding the extrinsic foot muscles to a strengthening protocol, a study to compare the extrinsic foot muscles versus the intrinsic foot muscles/extrinsic foot muscles constituting the medial longitudinal arch could be carried out.

Key Words

Medial longitudinal arch, electrostimulation, active strengthening, stability

Avertissement

Les prises de position, la rédaction et les conclusions de ce travail n'engagent que la responsabilité de ses auteurs et en aucun cas celle de la Haute École de Santé de Genève, du Jury ou du Directeur du Travail de Bachelor.

Nous attestons avoir réalisé seules le présent travail, sans avoir utilisé d'autres sources que celles indiquées dans la liste de références bibliographiques.

Genève, le 5 juin 2020

Sara Isidoro Oliveira

Elodie Ranzoni

Julinar Sharaiha

Remerciements

Nous tenons à présenter nos remerciements les plus sincères aux personnes qui ont participé à la réalisation de ce protocole :

Mme Aline Reinmann, physiothérapeute, assistante d'enseignement à la Haute École de Santé ainsi que directrice de notre travail de Bachelor que nous remercions pour les conseils, le soutien et l'aide apportée au bon déroulement de ce travail.

Mme Simone Gafner, physiothérapeute, adjointe scientifique HES et enseignante à la Haute École de Santé ainsi que directrice de notre travail de Bachelor que nous remercions pour les conseils, le soutien et l'aide apportée au bon déroulement de ce travail.

M. Yvan Leuridan, physiothérapeute, enseignant à la Haute École de Santé que nous remercions pour les conseils permettant la bonne réalisation de ce travail.

M. Jean-David Sandoz, bibliothécaire-documentaliste-archiviste, au sein de la Haute École de Santé de Genève que nous remercions pour son assistance dans le processus de recherche scientifique.

Nos proches, pour leur soutien tout au long du projet et leur relecture.

Nous tenons également à remercier tous les professeurs et assistants de la filière physiothérapie qui ont assisté à nos séminaires et nous ont permis de mener au mieux la rédaction de ce travail de Bachelor.

Liste des abréviations

ABD de l'hallux : Abducteur de l'hallux

ALM : Arche longitudinale médiale

CCI : Coefficient de corrélation intra-classe

FPI-6 : Foot Posture Index

IC : Intervalle de confiance

MEP : Muscles extrinsèques du pied

MIP : Muscles intrinsèques du pied

NDT : Navicular Drop Test

TB : Theraband

YBT : Y Balance Test

Table des matières

1. Introduction	1
2. Cadre théorique.....	2
2.1 Rôle et importance de la voûte plantaire	2
2.1.1 Physiologie de la voûte plantaire : rôle des arches	2
2.2 Intérêt pour le renforcement de la voûte plantaire.....	5
2.2.1 Renforcement des MIP	5
2.2.2 Renforcement des MEP.....	6
2.2.3 Électrostimulation couplée à des exercices actifs	6
2.3 Question de recherche.....	7
2.4 Outcomes.....	7
2.4.1 Primaire	7
2.4.2 Secondaires	8
2.5 Objectifs de l'étude et hypothèses.....	8
2.5.1 Objectifs liés à l'outcome primaire	8
3. Méthodologie	9
3.1 Procédure	9
3.2 Recrutement des thérapeutes et examinateurs.....	10
3.3 Recrutement des sujets	11
3.3.1 Test d'inclusion.....	11
3.3.2 Critères d'inclusion et d'exclusion.....	12
3.4 Design expérimental.....	13
3.5 Randomisation et assignation.....	13
3.6 Aveuglement	14
3.6.1 Thérapeutes et sujets	14
3.6.2 Examineurs.....	14
3.7 Tests.....	15
3.7.1 La stabilité de l'arche médiale par le Navicular Drop Test	15
3.7.2 L'équilibre dynamique par le Y Balance Test	15
3.7.3 La force des MIP au dynamomètre	16
3.7.4 La force des MEP par l'appareil isocinétique	18
3.8 Interventions	20
3.8.1 Groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs.....	20

3.8.2	Groupe de renforcement actif.....	22
4.	Schéma expérimental.....	26
5.	Statistiques	27
5.1	Taille de l'échantillon.....	27
5.2	Objectifs liés à l'outcome primaire.....	27
5.3	Traitement des données	29
5.3.1	Statistiques descriptives	29
5.3.2	Statistiques inférentielles	29
6.	Aspects éthiques	29
6.1	Risque pour les participants.....	29
6.2	Protection des données.....	29
6.3	Commission d'éthique	29
7.	Événements indésirables.....	30
8.	Aspects financiers.....	30
9.	Récolte des données.....	30
10.	Discussion.....	31
11.	Conclusion.....	38
12.	Références	I
	Annexe I : Myologie	II
	Annexe II : Objectifs et hypothèses secondaires	IV
	Annexe III : Formulaire de consentement et de confidentialité	VII
	Annexe IV : Tableaux récapitulatifs des tests	VIII
	Annexe V : Tableau d'intervention du groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs	IX
	Annexe VI : Tableau d'intervention du groupe actif.....	X
	Annexe VII: Tableau Theraband selon article Guex et al., (2015).....	XI
	Annexe VIII : Liste du matériel.....	XII
	Annexe IX: Case report Form	XIII

1. Introduction

Dans la littérature scientifique, un affaissement de la voûte plantaire est lié à la survenue de pathologies du membre inférieur telle que l'entorse de cheville (Baumhauer et al., 1995). La voûte plantaire est constituée de quatre arches ; transversale antérieure et postérieure, ainsi que longitudinale médiale et latérale (Drake et al., 2010). Dans le cadre de ce protocole, l'intérêt se portera sur l'arche longitudinale médiale (ALM). En effet, une voûte affaissée est induite lorsque l'ALM n'est plus capable de maintenir sa position menant à des dysfonctions structurelles ou fonctionnelles (Kim & Kim, 2016). Suite à cela, la capacité à absorber les impacts, l'équilibre et la stabilité seront diminués (Kim & Kim, 2016).

L'ALM est constituée d'un muscle intrinsèque du pied (MIP) et de quatre muscles extrinsèques du pied (MEP) (Soysa et al., 2012) (cf. Annexe I). Plusieurs articles se sont intéressés à la force des muscles intrinsèques du pied (Ebrecht & Sichting, 2018 ; Fourchet, 2009 ; McKeon & Fourchet, 2015 ; Soysa et al., 2012). À notre connaissance, aucune étude n'aborde le renforcement des MEP dans le cadre de l'ALM.

L'objectif principal de cette étude sera d'évaluer l'impact de l'ajout de l'électrostimulation couplée à des exercices actifs versus un renforcement musculaire actif seul sur la stabilité de l'ALM mesurée par le Navicular Drop Test (NDT) chez des sujets sains. Les outcomes secondaires seront l'équilibre dynamique et la force. Concernant les modalités de renforcement, il semblerait que l'utilisation de l'électrostimulation couplée à des exercices actifs soit la plus recommandée dans le cadre du renforcement des MIP (Ebrecht & Sichting, 2018). Cependant, cette modalité n'a pas encore été évaluée sur les MEP constituant l'ALM.

Ce protocole est proposé dans le but d'être réalisé dans le cadre d'un travail de Bachelor au sein de la Haute École de Santé (HEdS). Deux étudiants de 3^{ème} année pourront réaliser ce dernier avec pour sujets les étudiants physiothérapeutes de la filière.

2. Cadre théorique

2.1 Rôle et importance de la voûte plantaire

L'entorse de cheville représente la blessure musculosquelettique avec la plus haute prévalence (Gribble et al., 2016). Au moins 50% de la population souffrira au minimum une fois dans le cours de sa vie d'une entorse de cheville (Mei-Dan et al., 2005). Cette pathologie possède le plus haut taux de récurrence (deux fois augmenté durant la première année) dans le contexte des blessures musculosquelettiques (Gribble et al., 2016). Il ressort de la littérature, un lien entre la physiologie de la voûte plantaire et la survenue d'entorse de cheville. En effet, selon Baumhauer et al. (1995), une voûte affaissée est accompagnée d'une éversion permanente et ainsi, d'un raccourcissement et un affaiblissement des muscles fibulaires. Ce phénomène provoque un temps de réaction retardé et augmente donc le risque de survenue d'entorse de cheville (Baumhauer et al., 1995). Une étude de Mei-Dan et al. (2005), a donc par la suite cherché à mettre en lumière un lien entre un affaissement de la voûte plantaire et l'entorse de cheville via une analyse d'empreinte de pied. Leur étude rétrospective a permis de mettre en évidence une différence significative de survenue d'entorse de cheville du groupe de sujets présentant une arche affaissée par rapport au groupe contrôle, présentant une arche normale. À la lumière de ces informations, il paraît pertinent de s'intéresser à la voûte plantaire et à sa physiologie dans le cadre de cette pathologie.

2.1.1 Physiologie de la voûte plantaire : rôle des arches

Le contrôle dynamique du pied est régi par trois systèmes illustrés schématiquement par un modèle appelé « The Foot Core System » ou principe de gainage du pied (cf. Figure 1) (McKeon & Fourchet, 2015). Ce modèle met en lien l'interaction entre les structures actives (musculaires), passives (ligamentaires et osseuses) ainsi que l'organisation sensori-motrice permettant une efficacité du fonctionnement du pied lors de la station debout et la marche (Tourillon, 2019).

Les structures osseuses du système **passif**, de par leur position anatomique, forment la voûte plantaire, elle-même composée de quatre arches ; transversale antérieure et postérieure ainsi que longitudinale médiale et latérale (Drake et al., 2010). Les arches ont des rôles précis et importants pour la déambulation ainsi que la station debout, ceci grâce à leur capacité d'adaptation selon les terrains sur lesquels le pied évolue.

Elles ont un rôle d'élasticité, de transmission de force et d'amortissement de chocs (Kapandji, 2018). De plus, les quatre arches du pied réunies, forment un demi-dôme fonctionnel capable de s'adapter aux changements de positions et de charges durant les activités (McKeon & Fourchet, 2015).

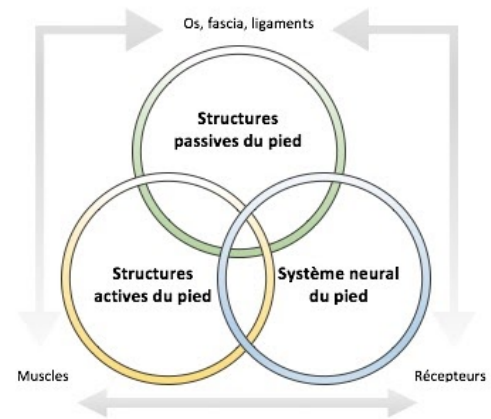


Figure 1. Principe de gainage du pied
(tiré de McKeon & Fourchet, 2015)

Des quatre arches, l'ALM est celle permettant de maintenir la position de la voûte plantaire. Ainsi, si l'ALM n'est plus capable de maintenir sa position, cela provoque une position du pied en pronation excessive avec un talon en éversion (Kim & Kim, 2016). L'ALM est étendue entre la tubérosité du calcanéum et la tête du 1^{er} métatarsien avec son sommet au niveau de l'os naviculaire (Kapandji, 2018). Ces derniers sont reliés par différents ligaments ; les plantaires, le calcanéonaviculaire inférieur et enfin le talocalcanéen (Kapandji, 2018). Ces structures passives sont renforcées par le complexe actif musculaire suivant : le tibial postérieur, le long fibulaire, le fléchisseur commun des orteils, le fléchisseur de l'hallux ainsi que l'abducteur de l'hallux (ABD de l'hallux) (cf. Annexe I) (Kapandji, 2018).

Le système **actif** correspond à l'ensemble des muscles et des tendons divisés en deux catégories :

- Les MIP qui sont considérés comme stabilisateurs locaux. Ces derniers s'insèrent proximement et distalement sur le pied (Soysa et al., 2012).
- Les MEP sont considérés comme mobilisateurs globaux. Ces derniers ont leur origine proximale sur le tibia, la fibula et la membrane interosseuse pour s'insérer distalement sur le pied (Soysa et al., 2012).

Sur la face plantaire, les MIP se dissocient en quatre couches musculaires. Ces dernières ont des orientations de tendon comparables à l'aponévrose plantaire (McKeon & Fourchet, 2015). Comme illustré dans le schéma ci-dessous, les deux premières couches musculaires (correspondant aux muscles n°1,2,3,4,5 sur la figure 2), en raison de leur anatomie, sont essentiellement attachées aux configurations anatomiques des arches longitudinales médiales et latérales alors que les deux autres couches sont attachées aux arches transversales antérieures et postérieures.

Selon Wilson et Lichtwark (2011), les MIP, notamment l'ABD de l'hallux (1) possèdent de petites fibres musculaires (<25 mm) et un corps tendineux long (100 mm), ce qui permet, un stockage et une restitution d'énergie élastique pendant le cycle d'étirement. De plus, leurs petites surfaces de section transversales leur assurent le rôle de premiers stabilisateurs des arches (Wilson & Lichtwark, 2011). Ces derniers permettent ainsi le contrôle de la hauteur de l'ALM, de la pronation du pied et du degré de déformation de l'arche (Fourchet & Gojanovic, 2016).



Figure 2. Quatre couches musculaires des muscles intrinsèques du pied (tiré de McKeon & Fourchet, 2015)

Comme décrit ci-dessus, les MEP sont considérés comme mobilisateurs globaux. La disposition des tendons musculaires du tibial postérieur et du long fibulaire démontre leurs capacités à fournir un soutien dynamique lors de la déformation des deux arches (McKeon & Fourchet, 2015).

Le troisième système est défini comme **neural** et se compose essentiellement des récepteurs sensoriels à l'intérieur des structures ligamentaires, tendineuses, des fascias, de la peau ou encore de l'aponévrose plantaire. Beaucoup de recherches dans ce domaine ont permis de mettre en évidence que la sensation plantaire, par la contribution des récepteurs sensitifs cutanés, est fondamentale et permet ainsi le maintien de la posture statique et dynamique du pied durant la marche (Eils et al., 2002 ; McKeon & Hertel, 2007). La littérature actuelle a mis en avant l'importance des MIP au sein du système neural (McKeon et al., 2014). Selon McKeon & Fourchet (2015), la position anatomique et la fonction des MIP leur donnent un rôle primordial dans la transmission d'informations sensorielles et sur la position immédiate de la voûte plantaire via le réflexe d'étirement (stretch response). Ainsi, les MIP jouent un rôle dans l'aspect sensorimoteur par les mécanorécepteurs utilisés dans le « stretch response » informant de la position de l'arche.

Ils participent de ce fait au système actif par le changement de position du pied, et au système neural qui donne des informations pertinentes sur la position du dôme plantaire (McKeon & Fourchet, 2015).

En conclusion, ces trois systèmes de gainage du pied ou « Foot Core System » (cf. Figure 1) ont un impact sur le fonctionnement optimal de la dynamique du pied (McKeon & Fourchet, 2015).

2.2 Intérêt pour le renforcement de la voûte plantaire

2.2.1 Renforcement des MIP

Comme abordé précédemment, le rôle de l'ALM est primordial pour le bon fonctionnement du pied. Une altération de ce système pourrait engendrer des dysfonctionnements et des pathologies au niveau du membre inférieur, comme des fasciopathies plantaires (Huffer et al., 2017) ou encore des neuropathies périphériques (Soysa et al., 2012). Ainsi, il paraît pertinent de s'intéresser à la rééducation de cette problématique, notamment par le biais du renforcement musculaire (Soysa et al., 2012). En effet, il est important de renforcer les MIP car ces derniers sont des stabilisateurs locaux et jouent un rôle important dans le contrôle postural et le maintien de l'équilibre postural lors de la station debout (Soysa et al., 2012).

Plusieurs études (Fiolkowski et al, 2003 ; Headlee et al., 2008 ; McKeon & Fourchet, 2015 ; Tourillon, 2019) ont permis de faire un lien entre une fatigue ou une dysfonction des MIP et sur la stabilité. Ces études ont démontré qu'une dysfonction, une insuffisance musculaire ou l'absence de l'activité des MIP, impacte négativement le contrôle et la stabilité du pied durant la station debout (McKeon & Fourchet, 2015). Dans ces études, le test utilisé pour mesurer la stabilité était le NDT. Ce dernier identifie la différence, en millimètres, de la hauteur de la tubérosité de l'os naviculaire dans l'articulation sous-talienne en position relâchée puis en charge (Zuil-Escobar, 2018). Le NDT permet ainsi de démontrer une incapacité des trois systèmes de gainage du pied décrits ci-dessus, et tout particulièrement l'incapacité des MIP à maintenir la position de l'ALM (Tourillon, 2019). Fiolkowski et al. (2003) ont réalisé un bloc nerveux via le nerf tibial chez une cohorte de jeunes hommes et ont retrouvé une diminution de l'activité de l'ABD de l'hallux engendrant une chute du naviculaire. Ainsi, si l'activité des MIP est réduite, une chute du naviculaire est retrouvée.

S'il est permis de mettre en évidence un lien entre une chute du naviculaire objectivable au NDT et une fatigue des MIP, il est prouvé qu'un renforcement de ces derniers permet un effet inverse (McKeon & Fourchet, 2015). Un protocole de Mulligan et Cook (2013), a démontré que quatre semaines de renforcement des MIP provoquaient une chute significativement diminuée du naviculaire objectivable par le NDT. Ils ont également évalué la stabilité dynamique via le Star Excursion Balance Test, et ont mis en évidence une amélioration significative des résultats des sujets. Une étude de Kim & Kim (2016), a proposé un protocole de renforcement des MIP de 30 minutes, trois fois par semaine durant cinq semaines. Les résultats ont montré une diminution significative du NDT, améliorant ainsi la stabilité (Kim & Kim, 2016). Quant aux résultats du Y Balance Test (YBT), dérivé du Star Excursion Balance Test, une différence significative de l'équilibre dynamique a été relevée (Kim & Kim, 2016). Le renforcement des MIP a également été proposé au sein de plusieurs études abordant l'entorse de cheville ainsi que les instabilités chroniques de cheville (Feger et al., 2016 ; Fraser et al., 2016). Cependant, en pratique, les MIP ont tendance à être négligés et non pris en compte dans la rééducation (Fourchet & Gojanovic, 2016).

2.2.2 Renforcement des MEP

Lors des différentes recherches effectuées sur le renforcement de l'ALM, il a été mis en évidence le manque de protocoles incluant les MEP dans le renforcement de cette dernière. En effet, les diverses recherches sur les MIP excluent les MEP de leurs protocoles. Les MEP, muscles à grand bras de levier, sont les principaux moteurs du pied et assurent une certaine stabilité de la voûte plantaire (McKeon & Fourchet, 2015). Les MEP sont donc d'une importance primordiale pour un bon équilibre et pour une bonne tenue de la voûte plantaire. Ils prouvent leur importance dans leur synergie musculaire avec les MIP dans le but d'éviter la survenue de pathologies et de douleurs du membre inférieur. La biomécanique et la fonction de ces muscles tendent à convaincre de l'importance de ne pas exclure les muscles bi-articulaires du pied dans le cadre du renforcement de l'ALM.

2.2.3 Électrostimulation couplée à des exercices actifs

Il paraît donc important de renforcer l'ALM via les MEP et MIP. Concernant les modalités de renforcement, plusieurs protocoles ont proposé une approche du renforcement des MIP via électrostimulation. Selon Ebrecht et Sichting (2018), l'électrostimulation offre l'avantage d'augmenter l'activation neurale par une stimulation locale, isolée et contrôlée.

Une étude menée par Fourchet et al. (2009), a montré une diminution significative de la chute du naviculaire suite à un protocole d'électrostimulation des MIP chez les patients présentant une pronation excessive. De plus, l'électrostimulation semble être une modalité prometteuse et un outil performant dans la réhabilitation et la prévention de la survenue d'entorse de cheville (McKeon & Fourchet, 2015).

Toutefois, il semblerait que l'électrostimulation soit encore plus efficace lorsqu'elle est couplée à des exercices actifs. En effet, une étude de Namsawang et al. (2019), a réalisé un renforcement des MIP via électrostimulation couplée à un exercice actif (short-foot) et a comparé ces résultats selon la même modalité mais cette fois sans courant électrique, l'électrostimulation agissant ainsi comme placebo. Cette étude a démontré qu'un programme de renforcement via électrostimulation couplée à des exercices actifs aurait plus d'effet sur la stabilité statique et dynamique de la voûte plantaire que l'électrostimulation seule (Namsawang et al., 2019).

Cependant, il n'existe pas de protocole proposant une comparaison entre un renforcement des muscles constituant l'ALM par électrostimulation couplée à des exercices actifs et un renforcement actif. De plus, aucun protocole ne propose de modalités de renforcement actif contre résistance. Finalement, l'intérêt de l'ajout des MEP aux MIP, dans le contexte de renforcement de l'ALM, n'a pas été encore évalué.

2.3 Question de recherche

L'ensemble des points mentionnés ci-dessus concernant l'influence des MIP et MEP sur la fonction de l'ALM ainsi que les avantages de l'électrostimulation couplée à des exercices actifs dans le renforcement des MIP, nous a conduit à la question de recherche suivante :

« Quel est l'impact du renforcement musculaire actif versus électrostimulation couplée à des exercices actifs des muscles constituant l'arche longitudinale médiale du pied sur la stabilité, l'équilibre dynamique et la force chez le sujet présentant un pied pronateur objectivable au Foot Posture Index ? »

2.4 Outcomes

2.4.1 Primaire

L'outcome primaire est la stabilité de l'ALM, il sera évalué via le NDT. Ce test quantitatif est utilisé dans le but de tester cliniquement la stabilité de l'ALM (Ebrecht & Sichtung, 2018).

Ainsi, des valeurs hautes du NDT sont associées avec un pied en pronation et une ALM basse tandis que des valeurs basses sont associées avec un pied supinateur et une ALM haute (Zuil-Escobar, 2018). Pour les hypothèses, se référer au chapitre 5 « Statistiques ».

2.4.2 Secondaires

Les outcomes secondaires sont l'équilibre dynamique et la force.

Le YBT sera utilisé afin d'évaluer l'équilibre dynamique. Ce test quantitatif, développé en 2009 par Plisky et al., permet d'évaluer cliniquement la stabilité dynamique unipodale lors des mouvements du membre oscillant dans trois directions (Bruyneel & Gard, 2018). La force, elle, sera évaluée de deux manières différentes, séparant ainsi les MIP et les MEP. Les MIP seront évalués via un dynamomètre portatif tandis que les MEP seront évalués au moyen d'un appareil isocinétique décrit par David et al. (2013). Au vu de leur position anatomique, il n'est pas possible d'évaluer de manière directe la force du muscle tibial postérieur et du long fibulaire. Dans le cadre de ce protocole, ces derniers seront évalués en participation des autres muscles inverseurs et éverseurs.

2.5 Objectifs de l'étude et hypothèses

2.5.1 Objectifs liés à l'outcome primaire

Objectif principal

Évaluer l'impact de l'ajout de l'électrostimulation à un renforcement musculaire actif versus renforcement musculaire actif seul sur la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT chez des sujets sains.

Objectifs secondaires

- Évaluer l'effet d'un programme de renforcement musculaire par électrostimulation couplée à des exercices actifs sur la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT chez des sujets sains.
- Évaluer l'effet d'un programme de renforcement actif chez des sujets sains sur la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT.
- Évaluer la différence de l'effet de deux différents traitements sur la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT, soit un programme de renforcement via électrostimulation couplée à des exercices actifs et un programme de renforcement actif.

Pour les hypothèses de l'outcome primaire, se référer au chapitre 5 « Statistiques ». Les objectifs et les hypothèses liés aux outcomes secondaires sont en Annexe II.

3. Méthodologie

3.1 Procédure

Cette étude, contrôlée randomisée, a été construite dans le but d'être mise en pratique par des futures volées d'étudiants dans le cadre de leur travail de Bachelor. La procédure débutera par le recrutement des sujets. Les étudiants de la HEdS physiothérapie intéressés à participer à l'étude seront invités à se présenter auprès des thérapeutes afin de leur permettre de réaliser le test d'inclusion, soit le Foot Posture Index (FPI-6).

Par la suite, les thérapeutes (cf. chapitre 3.2) contacteront par e-mail les sujets positifs au test d'inclusion. Ce courrier contiendra leurs résultats, une explication détaillée du protocole ainsi qu'une feuille de consentement (cf. Annexe III).

Chaque sujet devra confirmer sa participation en réponse à ce mail dans un délai de 48h. La feuille de consentement sera remise en main propre le plus rapidement possible suite à la confirmation. Enfin, une liste des sujets inclus au sein de l'étude ainsi que leurs données démographiques seront établies par les deux thérapeutes.

Suite à la validation du test d'inclusion et à la randomisation des sujets (cf. chapitre 3.5), un e-mail de convocation sera envoyé pour une séance d'information. Cette dernière se déroulera en deux fois afin d'être spécifique à chaque groupe. Le but de cette séance sera d'expliquer le déroulement et la description des tests d'évaluation (NDT, YBT, l'appareil isocinétique pour la force musculaire des MEP et le dynamomètre portatif pour la force musculaire des MIP) (cf. Annexe IV) ainsi qu'une formation sur le contenu et le déroulement de leurs protocoles respectifs. Pour l'électrostimulation couplée à des exercices actifs, les sujets seront renseignés sur l'utilisation du matériel, les modalités, les contre-indications, la vigilance quant à l'utilisation du matériel, le placement des électrodes ainsi que le placement du tape et toutes autres consignes nécessaires au bon déroulement du protocole (cf. chapitre 3.8.1). Les consignes du groupe actif seront axées sur le positionnement, les modalités ainsi que l'enseignement de la progression des résistances du Theraband (TB) (cf. chapitre 3.8.2).

En parallèle, une séance dédiée aux examinateurs (stagiaires de 3^{ème} année au cabinet des Caroubiers) sera prévue. En effet, ceux-ci seront amenés à tester les sujets lors du bilan initial et final. Cette séance leur permettra de se familiariser avec le matériel, de se former à la réalisation et au déroulement des tests.

Pour la réalisation du bilan initial, les sujets de chaque groupe seront contactés par e-mail et se présenteront ainsi sur deux jours.

Suite à la randomisation, les sujets seront répartis en deux groupes ; le premier groupe effectuera un protocole de renforcement de l'ALM de six semaines à raison de trois fois par semaine via l'électrostimulation couplée à des exercices actifs, tandis que le deuxième groupe effectuera le protocole via des exercices actifs uniquement avec la même temporalité. Au cours du protocole, il sera important de conserver un suivi régulier des patients pour une prise en charge et une réalisation optimale du protocole. Pour ce faire, il a été décidé d'avoir un retour de la part des sujets toutes les semaines jusqu'à la fin de celui-ci. Les thérapeutes contacteront les sujets afin de leur demander un feed-back via e-mail suite à la séance de la semaine en expliquant :

De manière générale :

- Si le sujet a des questions concernant le protocole.
- Si le sujet rencontre ou a rencontré un problème durant les séances.

Pour le groupe actif :

- Si la résistance du TB a augmenté. Si oui, mentionner la couleur ainsi que la longueur de ce dernier.

Pour le groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs :

- Si le sujet tolère bien l'électrostimulation. Si non, préciser le problème en détail.

À la suite de ces six semaines d'intervention, un bilan final sera effectué au moyen des quatre tests utilisés lors du bilan initial. Le schéma expérimental décrit au chapitre 4 synthétise le déroulement de cette étude.

3.2 Recrutement des thérapeutes et examinateurs

Pour effectuer les bilans d'entrée et de sortie ainsi que les interventions, deux thérapeutes et deux examinateurs seront nécessaires.

Les deux thérapeutes, étudiants physiothérapeutes en 3^{ème} année réalisant leur travail de Bachelor, effectueront le recrutement des sujets, animeront les séances d'informations et suivront ensemble les deux groupes lors des six semaines de protocole.

Les examinateurs, au nombre de deux, étudiants physiothérapeutes en 3^{ème} année en stage au cabinet des Caroubiers, réaliseront les tests lors des bilans d'entrée et de sortie. La bonne fiabilité inter-examinateurs des tests choisis dans cette étude, décrite au chapitre 3.7, permet la justification de la présence de deux examinateurs.

3.3 Recrutement des sujets

Les 60 sujets nécessaires à l'étude (cf. chapitre 5.1), seront recrutés via un e-mail regroupant les trois volées d'étudiants de physiothérapie. Ce premier contact aura pour but d'annoncer la mise en place d'une expérimentation, d'expliquer la thématique du protocole et ses objectifs. Lors du recrutement, les thérapeutes devront donc vérifier les critères d'inclusion et d'exclusion décrits au chapitre 3.3.1. Les sujets auront la possibilité de poser leurs éventuelles questions et seront également abordés les risques et bénéfices du protocole, le lieu de prise en charge, la procédure pour se retirer de l'étude et les instructions de confidentialités. Tous les sujets seront majeurs et ainsi ne nécessiteront pas d'un accord parental supplémentaire. Les sujets seront informés qu'à tout moment il leur sera possible d'abandonner l'étude. Dans ce cas, il leur sera demandé de contacter au plus vite les deux thérapeutes afin de les en informer. Les sujets ne seront pas dans l'obligation d'explicitier les raisons de leur départ de l'étude.

3.3.1 Test d'inclusion

Le FPI-6 est une méthode validée comprenant six paramètres basés sur l'observation et la palpation de l'avant et de l'arrière-pied qui permettent de quantifier la posture en charge (Redmond et al., 2008).

Justification

La fiabilité intra-examineur s'est révélée excellente selon la littérature avec un coefficient de corrélation intra-classe (jambe gauche : CCI= 0.95, 95% IC ; 0.92-0.97) (jambe droite : CCI= 0.95, 95% IC ; 0.93-0.97). Ainsi, ce test est un moyen fiable et standardisé qui permet d'apprécier et de quantifier la posture du pied pour une population saine entre 23 et 30 ans (Terada et al., 2014).

Réalisation

L'examen est réalisé en station debout, le sujet regardant droit devant lui, bras le long du corps. Les points de repères pour l'observation et la palpation sont les suivants (Evans et al., 2003) :

- la palpation de la tête du talus ;
- l'observation des courbes supérieures et inférieures de la malléole latérale ;
- l'observation du positionnement frontal du calcaneum. L'amplitude en inversion/éversion du calcaneum ;
- l'observation de la protubérance au niveau de l'articulation talo-naviculaire ;
- l'observation de la congruence et de la hauteur de l'ALM ;

- l'observation de l'amplitude en adduction/abduction de l'avant-pied par rapport à l'arrière-pied.

Chacun des items possède une cotation de cinq points allant de -2 à +2. Les chiffres négatifs démontrent un pied en posture de supination tandis que les chiffres positifs indiquent un pied en position de pronation. Un score total est donc établi de -12 à +12 sur la base des six items d'évaluation. Un sujet présentant un score de 10 ou supérieur est donc classifié comme pied fortement pronateur, un score compris entre +6 et +9 est un pied pronateur. Un pied sera qualifié de neutre entre 0 et +5 tandis qu'un pied sera supinateur entre -4 et -1 et fortement supinateur avec un score de -5 et inférieur (Terada et al., 2014).

Les participants de l'étude devront donc présenter un FPI avec un score compris entre +6 et +12 correspondant à un pied entre légère et forte pronation et ainsi, une arche abaissée. En effet, un pied pronateur provoque une éversion permanente et donc un affaissement de l'ALM. De plus, les caractéristiques d'un pied pathologique ont été décrites telle qu'une posture en pronation excessive (Kaufman et al., 1999). D'autre part, une dysfonction du muscle tibial postérieur est une des causes communes de « pied plat » chez l'adulte, résultant d'une dysbalance entre la structure musculaire et le tendon (Coughlin & Mann, 1996). En outre, il semblerait que la posture du pied additionnée à la faiblesse des muscles de l'ALM ainsi qu'à l'insuffisance des structures passives, pourraient être un facteur favorisant l'apparition de pathologies de sur-sollicitation (Headlee et al., 2008 ; McKeon & Fourchet, 2015). En effet, l'hyperpronation provoquerait ainsi des blessures spécifiques de type apénovrosites plantaires, tendinopathies achilléennes ou du tibial postérieur, métatarsalgies, fracture de fatigue de la tête des premier et deuxième métatarsiens ou encore des périostites (Weist et al., 2004).

3.3.2 Critères d'inclusion et d'exclusion

Pour être admissibles au sein de l'étude, les sujets devront remplir les conditions suivantes :

- Présenter un FPI d'une échelle comprise entre +6 et + 12 (posture en pronation) ;
- Âge compris entre 18 et 40 ans, représentatif de la tranche d'âge des étudiants des trois volées de physiothérapie.

Les critères d'exclusion sont les suivants :

- Épisode d'entorse de pied ou de la cheville durant les deux dernières années (Anandacoomarasamy & Barnsley, 2005) ;
- Fracture du pied, de la cheville ou du membre inférieur il y a moins d'un an (Tourillon, 2019). Selon Franco-de la Torre et al. (2019), une fracture d'un os long se consolide dans un délai de sept mois et demi ;
- Thérapie de renforcement de la voûte plantaire effectuée il y a moins de trois ans (Tourillon, 2019) ;
- Déficit neurologique et vestibulaire (Tourillon, 2019). Selon Collard (1994), un lien est établi entre un déficit vestibulaire et un trouble de la fonction d'équilibre ;
- Port de pacemaker (contre-indication à l'électrostimulation) ;
- Antécédent d'épilepsie (contre-indication à l'électrostimulation) ;
- Grossesse (contre-indication à l'électrostimulation) ;
- Allergies au matériel (contre-indication à l'électrostimulation).

3.4 Design expérimental

Cette étude quantitative est un essai contrôlé randomisé. Les participants seront séparés en deux groupes ; un groupe de renforcement actif des MIP et MEP d'une durée de 31 minutes et un groupe de renforcement d'électrostimulation couplée à des exercices actifs des MIP et MEP d'une durée de 45 minutes. Les modalités d'intervention ainsi que leurs justifications sont décrites au chapitre 3.8.

Les quatre tests décrits dans le chapitre 2.4 se feront uniquement sur le pied dominant. En effet, le NDT a été décrit et mesuré sur le pied dominant (Zuil-Escobar, 2018). Pour déterminer le pied dominant, une étude de Kim & Kim (2016) utilise la méthode consistant à shooter dans un ballon. Le pied utilisé pour shooter sera donc le dominant.

3.5 Randomisation et assignation

Dans le cadre de cette étude, la randomisation sera effectuée par la secrétaire de la filière physiothérapie de la HEdS de Genève. Une randomisation dite « équilibrée » sera réalisée afin d'éviter un déséquilibre dans la répartition des sujets. La randomisation équilibrée consiste à tirer au sort la répartition entre le groupe 1 ou le groupe 2 pour chacun des sujets. La liste des participants (constitués par les deux thérapeutes suite à la signature de la lettre de consentement) sera transmise à la secrétaire de filière par e-mail.

La réalisation de la randomisation s'organisera de la manière suivante : 60 participants seront inclus dans l'étude, ces derniers seront divisés dans les deux groupes d'intervention par le biais de deux papiers (groupe 1 = électrostimulation couplée à des exercices actifs et groupe 2 = actif uniquement). Pour chacun des sujets, la secrétaire de l'école tirera au sort un des papiers, assignant un sujet à un groupe. Dès lors qu'un des groupes atteint un nombre de 30 participants, le restant des sujets est obligatoirement attribué à l'autre groupe. Ainsi, les deux groupes contiendront le même nombre de sujets participant au protocole d'électrostimulation couplée à des exercices actifs et le même nombre de sujets participant au protocole actif. Une fois la randomisation faite, la secrétaire de filière transmettra la liste de répartition des sujets aux thérapeutes qui contacteront les sujets afin de les inviter à la séance d'information pré-protocole décrite au chapitre 3.1.

3.6 Aveuglement

3.6.1 Thérapeutes et sujets

Dans le cadre de cette étude, l'aveuglement des thérapeutes et des sujets est impossible. En effet, les thérapeutes animeront les deux séances d'informations décrites dans le chapitre 3.1 et de ce fait, auront connaissance de la répartition des sujets dans les groupes. De plus, ils suivront les deux groupes tout au long des six semaines de protocole. Les sujets quant à eux, auront connaissance du protocole qu'ils suivront mais n'auront pas connaissance de la nature du protocole de l'autre groupe.

3.6.2 Examineurs

Les examineurs, étudiants de 3^{ème} année en stage au cabinet des Caroubiers, seront à l'aveugle lors des bilans d'entrée et de sortie. Aussi, lors de la réalisation de ceux-ci, ils n'auront pas connaissance de la répartition des sujets dans les deux groupes afin d'éviter tout biais lors de la mesure de paramètres des tests et ne participeront pas à l'intervention de six semaines. Une liste alphabétique des participants divisée en deux leur sera transmise ; deux journées seront prévues pour chaque groupe. Pour s'assurer de cet aveuglement, des consignes seront communiquées aux sujets. En effet, seules des questions ayant trait aux tests effectués lors des bilans initiaux et finaux pourront être admises.

3.7 Tests

3.7.1 La stabilité de l'arche médiale par le Navicular Drop Test

Justification

Selon l'étude de Zuil-Escobar (2018), la fiabilité du NDT est excellente. En effet, cet auteur démontre une très bonne fiabilité inter- (CCI= 0.94, 95% IC ; 0.89-0.97) et intra-évaluateur (CCI= 0.91, 95% IC ; 0.84-0.95).

Reproductible, valide et simplement exécutable, le NDT est un test validé pour une population de 18 à 35 ans (identique à celle de ce protocole) (Barton et al., 2010), dans l'évaluation de l'ALM.

Réalisation

Les participants sont assis sur une chaise avec une flexion de hanche, de genou et de cheville à 90° et pieds nus. L'examen se réalise par la palpation de la tubérosité de l'os naviculaire afin de marquer l'endroit précis d'un trait horizontal sur celui-ci à l'aide d'un crayon. Ensuite, la distance entre la marque effectuée et le sol est relevée/mesurée par une règle (résolution 0.5 mm). Le même procédé est répété debout. Le but est de relever la différence entre les deux mesures effectuées correspondant à la chute de l'os naviculaire (Ebrecht & Sichting, 2018). Le test est réalisé à trois reprises sur le pied dominant et la moyenne de ces mesures est conservée (Fourchet et al., 2009).

3.7.2 L'équilibre dynamique par le Y Balance Test

Justification

La reproductibilité intra et inter-évaluateur, pour une population d'adulte est bonne (CCI= 0.89, 95% IC ; 0.69-0.96 (Plisky et al., 2009) et CCI= 0.99, 95% IC ; 0.96-0.99 (Plisky et al., 2009)) respectivement.

Réalisation

Le dispositif est composé de trois règles postéro-latérale, postéro-médiale et antérieure, et d'une calle par règle. La branche antérieure fait un angle de 135° avec la branche postéro-latérale et postéro-médiale, les deux postérieures (postéro-latérale et postéro-médiale) sont espacées entre elles de 90°. Le patient est debout pieds nus en position unipodale avec l'avant du pied sur la jonction des trois règles. Les yeux sont ouverts et les membres supérieurs sont positionnés sur les hanches. Au moyen du pied oscillant, le patient déplace la calle aussi loin que possible sur la branche antérieure, puis sur la branche postéro-latérale pour finir sur la branche postéro-médiale.

Il revient au centre entre chaque mouvement sans toucher le sol (Bruyneel & Gard, 2018).

Le test se réalise avec le pied dominant en charge et le pied non dominant en oscillation, en effectuant trois essais dans les directions antérieure, postéro-latérale et postéro-médiale (Bruyneel & Gard, 2018).

Pour chaque direction, la distance parcourue entre le centre du dispositif et la position finale de la calle est relevée. La moyenne des trois essais sert donc de référence et sera ensuite normalisée selon la formule suivante : distance de déplacement (cm) (moyenne des trois essais) / longueur du membre (cm) x 100. Pour permettre ce calcul, la longueur du membre inférieur est mesurée en décubitus dorsal, entre l'épine iliaque antéro-supérieure et la malléole médiale (Gribble et al., 2012).

Chaque essai est annulé ou recommencé depuis le début si le sujet :

- Touche le sol avec son pied oscillant ;
- Perd l'équilibre à tout moment pendant le procédé ;
- Transfère son poids du corps sur le pied oscillant au moment du contact du sol ;
- Prend appui sur le pied oscillant pour revenir à la position initiale ;
- Si le pied d'appui bouge, se déplace et/ou son talon ou toute autre partie du pied se décolle ;
- Décolle les mains des hanches.



Figure 3. Y Balance Test (tiré de Tourillon, 2019)

3.7.3 La force des MIP au dynamomètre

Justification

Selon l'étude de Soysa et al. (2012), la fiabilité du dynamomètre portatif est excellente. En effet, ce dernier démontre une très bonne fiabilité intra-évaluateur avec un CCI s'élevant à 0.98. Cependant, la fiabilité inter-examineur n'a pas été calculée avec tous les types de dynamomètres.

En effet, seul le dynamomètre à main démontre une excellente fiabilité inter-évaluateur avec un CCI entre 0.82 et 0.88 dans cette même étude (Soysa et al., 2012).

Réalisation

La force des MIP sera mesurée à l'aide d'un dynamomètre portatif. Suite aux résultats trouvés dans la littérature, il a été décidé de tester la force en contraction isométrique de la manière suivante (Baur, 2016).

Fléchisseurs de l'hallux

Le sujet se tient debout pieds nus, en station bipodale, sur une caisse en bois.

La cheville est en position neutre de flexion-extension afin de minimiser la tension du fascia plantaire (Kurihara et al., 2014). Le patient se tient à l'aide de ses membres supérieurs. La procédure utilisée pour calculer la force des MIP au dynamomètre portatif demande, selon Baur (2016),

à placer ce dynamomètre sous l'articulation interphalangienne de l'hallux, tout en mesurant la tension du fil relié à la sangle qui entoure l'hallux. Ce dernier sera accroché au fil via le dynamomètre suspendu au plafond. Le mouvement à réaliser sera une contraction isométrique de l'hallux avec l'ordre suivant : « poussez votre hallux vers le sol » en demandant une contraction isométrique, le fil ne pouvant pas être modifié dans sa longueur. Pour ce

faire, il est important que les deux phalanges de l'hallux testé ne soient pas en charge et donc libres en avant de la caisse (Baur, 2016).

Pour limiter le recrutement d'autres muscles, le pied est fixé à la caisse en bois à l'aide d'une sangle pour ne pas emmener la cheville en flexion plantaire (Baur, 2016). La mesure de la force des fléchisseurs de l'hallux s'affiche sur l'écran du dynamomètre en kilogramme.

Un premier essai est demandé au sujet en force sous maximale afin de s'habituer au matériel.



Figure 4. Evaluation de la force des fléchisseurs de l'hallux au dynamomètre portatif (tiré de Baur, 2016)

Ensuite, le sujet réalise une contraction isométrique maximale durant trois secondes. Le meilleur résultat des trois essais sera relevé et retranscrit sur un tableau. Un repos d'une minute sera effectué entre chaque contraction (Kurihara et al., 2014).

Les recherches effectuées dans le cadre de ce protocole ont permis de mettre en évidence un manque de description de modalité d'évaluation de la force de l'abducteur de l'hallux. Par conséquent, il a été décidé d'utiliser l'étude de Baur (2016) et de s'inspirer de celle-ci pour réaliser la force au dynamomètre en contraction isométrique.

ABD de l'hallux

Le sujet se positionne en décubitus latéral supra latéral au membre testé. Le membre infra latéral est en flexion de hanche et de genou à 90°.

Il est possible de positionner un coussin sous le membre supra latéral du sujet selon la volonté et la préférence du patient. Le bord latéral du pied se trouve en direction du plafond. Le bord médial du pied, est en appui sur la table. Il est important que les orteils se retrouvent libres et en dehors de la table pour effectuer le test. L'examineur quant à lui, s'assure du bon positionnement du sujet sur la table avec un alignement des structures (tête, rachis). Pour limiter le recrutement d'autres muscles, il est important de stabiliser la cheville ainsi que l'avant-pied. Ainsi, le pied sera fixé sur la table à l'aide d'une sangle (Baur, 2016). Le dynamomètre accroché au plafond sera relié par un fil tendu à la sangle qui entoure l'hallux. Le mouvement demandé sera de réaliser une abduction de l'hallux en contraction isométrique. En dehors du positionnement, les modalités sont les mêmes que pour le fléchisseur de l'hallux.

3.7.4 La force des MEP par l'appareil isocinétique

Justification

Une fiabilité intra-examineur de l'appareil isocinétique avec un CCI de 0.92 a été calculée et définie comme bonne à excellente (Kaminski, 2001). Quant à la fiabilité inter-examineur, un résultat de 0.96 a été noté (Wong et al., 1984).

Réalisation

Afin de mesurer la force des muscles inverseurs et éverseurs du pied, il a été décidé d'utiliser un appareil isocinétique. Dans le cadre de ce protocole, deux raisons motivent ce choix.

Tout d'abord, il sera possible d'utiliser la machine disponible au sein de la HEdS filière physiothérapie dans l'idée que ce protocole puisse être réalisé dans le cadre d'un futur travail de Bachelor. Ensuite, l'appareil isocinétique est l'outil le plus souvent utilisé pour la mesure de la force des muscles du membre inférieur dans la littérature.

Une période de familiarisation de 15 minutes est prévue pour que chaque patient puisse prendre connaissance des différentes modalités/ spécificités de l'appareil. Un échauffement effectué en sous-maximal (50%) est proposé, suivi par cinq minutes de pause afin d'éviter la fatigue durant le test maximal.

La position des sujets est décrite ci-dessous :

- La chaise de l'appareil est penchée horizontalement à 25°, le sujet est en position semi-couchée, pieds nus (David, 2013) ;
- L'axe de rotation est dans l'axe de l'articulation sous-talienne (David, 2013) ;
- Débattement articulaire de 20° en inversion et 10° en éversion (Fourchet, 2013) ;
- La cheville est en flexion plantaire de 10° (Fourchet, 2013) ;
- L'appareil est ajusté afin de s'aligner au centre du pied en passant par le milieu de la patella et dans la continuité de la crête tibiale (David, 2013) ;
- La hanche est à 60° de flexion (David, 2013) ;
- Le genou est entre 30-40° de flexion (Fourchet, 2013).

Pour soutenir cette position, une sangle est accrochée au niveau de la hanche, de la partie distale du segment jambier et des pieds. Les angles des articulations sont mesurés à l'aide d'un goniomètre. Un coussin sous la cuisse et le genou est proposé afin de les soutenir durant le mouvement. La vitesse de mouvement de l'appareil est réglée à 60°/s et 120°/s en contraction concentrique (David, 2013 ; Fourchet, 2013). Pour le test maximal, l'instruction est de pousser contre la machine dans toute l'amplitude possible en inversion et en éversion. Des encouragements verbaux sont exprimés : « poussez le plus fort possible, le plus vite possible dans toute l'amplitude » (David, 2013). Le mouvement est répété dix fois pour une série. Trois séries sont exécutées pour un test. Une minute de pause entre chaque série est préconisée. Le meilleur résultat obtenu est conservé (Munn et al., 2002).

3.8 Interventions

Ce protocole vise à renforcer les muscles de l'ALM par le biais de l'électrostimulation couplée à des exercices actifs, puis d'y comparer à un groupe pratiquant des exercices de renforcement actif contre résistance avec un TB.

Afin d'offrir la meilleure configuration possible pour une stimulation musculaire maximale, ce protocole s'est inspiré des modalités décrites comme les plus optimales dans la littérature. De ce fait, les deux groupes effectueront un renforcement de respectivement 45 minutes (groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs) et de 31 minutes (groupe actif). Afin d'éviter une sur-sollicitation d'un groupe musculaire comparé à un autre, il a été décidé de ne pas ajouter d'exercices dans le groupe actif dans le but de combler la différence de temps. Une progression est proposée pour chacune des interventions ainsi que chacun des exercices décrits dans les paragraphes suivants.

3.8.1 Groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs

Tableau récapitulatif en Annexe V.

Lors de la séance d'informations décrite au chapitre 3.1, les sujets recevront toutes les informations nécessaires pour la réalisation du protocole. La première séance se déroulera sous supervision afin de s'assurer de la bonne utilisation du matériel d'électrostimulation. Le groupe d'électrostimulation couplée à des exercices actifs renforcera donc les MIP et MEP de l'ALM par le biais de trois exercices et d'un appareil d'électrostimulation (Compex 3 Professional, Medicompex SA, Ecublens, Switzerland). Les modalités du programme d'électrostimulation seront identiques durant les trois exercices.

Le programme d'électrostimulation est d'une durée de 15 minutes en programme amyotrophique avec un nombre de 75 répétitions. Dans le but d'avoir une contraction musculaire maximale, sans effets nuisibles sur la fatigue, ce courant est pulsé à ondes régulières, symétriques et bi-phasiques (85 Hz) et une largeur d'impulsion de 400 (μ s) (Maffiuletti et al., 2000 ; McKeon & Fourchet, 2015 ; Papaioordanidou, 2010). Le temps de contraction est de quatre secondes avec un temps de repos d'une durée de huit secondes (McKeon & Fourchet, 2015). Les exercices s'effectueront à une fréquence de trois fois par semaine sur une durée de six semaines avec au minimum un jour de repos entre les séances (Fourchet et al., 2009).

L'objectif au cours des 15 minutes de renforcement sera d'atteindre le plus haut niveau de contraction musculaire toléré par le sujet sans déclencher une sensation de douleur de façon à obtenir une contraction tétanique la plus importante (McKeon & Fourchet, 2015).

Selon les recommandations de la littérature, le positionnement des sujets, l'emplacement des électrodes, la réalisation des exercices ainsi que la progression, se dérouleront comme décrit ci-dessous.

Short-foot : Le muscle visé est l'ABD de l'hallux (MIP). Le sujet est debout, en bipodal. Une paire d'électrodes adhésives est positionnée en dessous de la tête du premier métatarsien (McKeon & Fourchet, 2015). Le mouvement consiste à raccourcir le pied, en faisant blanchir les articulations, sans faire la griffe. La progression se fera en augmentant l'intensité du courant en veillant à demeurer sous le seuil de tolérance du sujet (McKeon & Fourchet, 2015).

Mouvement d'inversion combiné à un mouvement de flexion des orteils et de l'hallux : Le muscle ciblé est le tibial postérieur ainsi que le long fléchisseur des orteils et de l'hallux (MEP). Le sujet est assis en position neutre de flexion/extension du pied. Un coussin est placé sous la cuisse de façon à surélever le pied du sol passivement. Une paire d'électrodes adhésives (1cm/1cm) est positionnée sur le point moteur du muscle visé, soit postérieur à la malléole médiale pour le tibial postérieur et sous la tête du talus pour les fléchisseurs des orteils et de l'hallux (Gondin et al., 2005).

Le mouvement se fait dans toute l'amplitude possible en portant l'avant-pied au plafond, en torsion interne tout en fléchissant les orteils et l'hallux. L'hallux doit être plus haut que le 5^{ème} doigt. Une fois le mouvement effectué, le sujet revient à la position initiale (McKeon & Fourchet, 2015). La progression se fera en augmentant l'intensité du courant en veillant à demeurer sous le seuil de tolérance du sujet (McKeon & Fourchet, 2015).

Mouvement d'éversion : Le muscle ciblé est le long fibulaire (MEP). Le positionnement est idem à l'exercice précédent. Les électrodes sont positionnées postérieurement à la malléole externe (Gondin et al., 2005).

Le mouvement se fait dans toute l'amplitude possible en portant l'avant-pied au plafond, en torsion externe. L'hallux doit être plus bas que le 5^{ème} doigt. Une fois le mouvement effectué, le sujet revient à la position initiale (McKeon & Fourchet, 2015).

La progression se fera en augmentant l'intensité du courant en veillant à demeurer sous le seuil de tolérance du sujet (McKeon & Fourchet, 2015).

Afin d'éviter tout biais, il est important de placer les électrodes aux mêmes endroits au cours de l'intervention. Pour ce faire, un morceau de tape sera positionné à l'emplacement des électrodes afin d'être le plus reproductible possible lors du placement des électrodes en vue de la prochaine séance. Ce procédé sera effectué lors de la première séance, sous supervision des deux thérapeutes.

3.8.2 Groupe de renforcement actif

Tableau récapitulatif en Annexe VI.

Lors de la séance d'informations décrite au chapitre 3.1, il sera demandé aux sujets d'installer une application de métronome sur leur téléphone portable. Ce dernier est réglé sur une fréquence de 60 battements par minute afin de s'assurer que chaque patient exécute les exercices de la manière la plus similaire possible (Herman, 2008). Le groupe actif renforcera les MIP et MEP de l'ALM via cinq exercices différents (Baltich et al., 2014).

Chaque exercice est composé de quatre séries de dix répétitions (Baltich et al., 2014). Pour chaque mouvement, les sujets se baseront sur cinq battements du métronome, effectueront le mouvement sur un battement puis tiendront la position durant deux et reviendront en position initiale en deux.

La pause dure un battement (Herman, 2008). La durée totale d'un mouvement est de six secondes. Le temps de repos entre chaque série est d'une minute. L'intervention sera de trois séances par semaine durant six semaines avec au minimum un jour de repos entre les séances (Fourchet et al., 2009 ; Herman, 2008). Les exercices sont décrits ci-dessous.

Short-foot : La réalisation de l'exercice est idem au groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs. La progression consistera à passer de la position assise, à debout et finir en unipodal (Baltich et al., 2014 ; Matias et al., 2006).

Abduction des orteils : Le muscle visé est l'ABD de l'hallux (MIP). Le sujet est debout, en bipodal. Le mouvement consiste à écarter le plus possible les orteils puis revenir dans la position initiale. La progression consistera à passer de la position assise, à la position debout et enfin en unipodal (Baltich et al., 2014 ; Matias et al., 2006).

Attraper un linge avec les orteils : Les muscles visés sont les fléchisseurs de l'hallux ainsi que les fléchisseurs des orteils (MEP). Le sujet est debout avec un linge sous les orteils et un appui sur le talon au sol.

Le mouvement consiste à serrer le linge avec les orteils puis de relâcher. La progression se fera en augmentant l'épaisseur du linge (Baltich et al., 2014 ; Matias et al., 2006).

Mouvement d'inversion du pied contre TB : Le sujet est assis, le TB est sous la tête du premier métatarse. Le mouvement se fait dans toute l'amplitude possible en portant l'avant pied au plafond, en torsion interne en fléchissant les orteils et l'hallux (Baltich et al., 2014 ; Matias et al., 2006). La progression est décrite ci-dessous.

Mouvement d'éversion du pied contre TB : Le sujet est assis avec le TB positionné sous la tête du 5^{ème} métatarse. Le mouvement se fait dans toute l'amplitude possible en portant l'avant pied au plafond, en torsion externe (Baltich et al., 2014 ; Matias et al., 2006). La progression est décrite ci-dessous.

Modalité de progression en fonction de la résistance du TB

Afin de cibler au mieux un renforcement actif adapté pour chaque patient, il a été décidé de s'inspirer de certaines méthodes décrites dans la littérature pour définir la résistance du TB. La méthode proposée dans le cadre de ce protocole sera donc la suivante : la charge maximum sur une répétition (1RM) des muscles inverseurs et éverseurs de tous les sujets sera testée via l'appareil isocinétique lors de leur test d'entrée. Une fois la 1RM obtenue, elle sera transformée en 10RM selon la formule de Brzycki : $RM \text{ estimée} = \text{Charge optimale} / 1.0278 - (0.0278 \times \text{nombre de répétitions})$, correspondant au nombre de répétitions des exercices du groupe de renforcement actif. Le résultat obtenu en Newton sera transformé en kilogramme en divisant le chiffre par 9.81. Une étude d'Uchida et al. (2016), a mesuré la différence de résistance des couleurs de TB en les comparant aux mesures données par le fabricant.

Ainsi, il est donc possible de se baser sur les tableaux proposés dans cette étude pour définir la résistance en kilogramme de chaque couleur de TB en fonction du pourcentage d'élongation (cf. Figure 5).

Résistance en kilogrammes	Pourcentage (%) d'élongation	Distance du TB en centimètres	Couleurs	Difficultés
0.83	50	37.5	Jaune	1
1.04	75	43.75		2
1.17	100	50		3
1.32	75	43.75	Rouge	4
1.60	100	50		5
1.56	75	43.75	Vert	6
1.82	100	50		7
2.14	75	43.75	Noir	10
2.51	100	50		11
3.22	75	43.75	Argent	12
3.89	100	50		13
4.69	75	43.75	Or	15
5.66	100	50		16

Figure 5. Palier de résistance du Theraband

Afin de proposer une progression durant les six semaines de protocole, chaque couleur est divisée par 50, 75 ou 100% d'élongation. Le sujet doit passer les différents paliers propres à la couleur avant de pouvoir changer cette dernière. La valeur en kilogramme obtenue sur la base du test de la 10RM permet de définir la couleur du TB et le pourcentage d'élongation pour le début du protocole.

Par la suite, les modalités d'intervention du groupe actif étant de dix répétitions durant quatre séries, le sujet doit calculer le nombre de répétitions qu'il est capable de réaliser lors de la 4^{ème} série. Si le sujet est capable de réaliser plus de dix répétitions, il lui sera demandé de passer à la difficulté suivante. Cette vérification sera réalisée à l'issue des quatre séries à chaque séance afin d'évaluer la progression du sujet en vue d'un changement de difficulté ou non, à la séance suivante (cf. Figure 6).

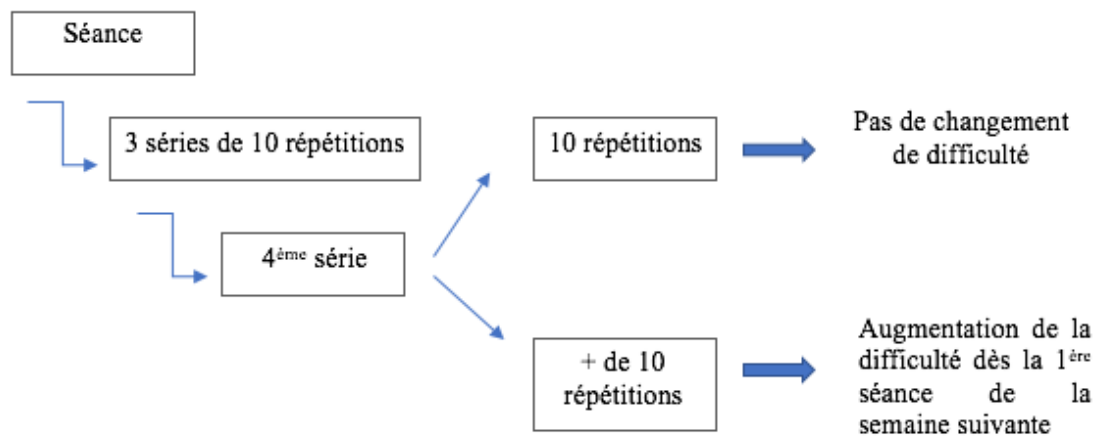


Figure 6. Progression du Theraband

Il est nécessaire d'avoir un positionnement correct et reproductible afin de respecter le pourcentage d'élongation. Pour ce faire, il a été décidé de se baser sur les données utilisées dans l'étude de Guex et al, (2015) (cf. Annexe VII). Ces derniers proposent un TB de 70 (cm) pour les fléchisseurs et extenseurs de genoux avec une amplitude de 90°. Un calcul en croix a été effectué permettant de mettre en évidence une longueur de 25 (cm) sur une base de 30° d'amplitude d'inversion et éverson de cheville. Cette mesure permet de calculer les distances nécessaires en fonction du pourcentage d'élongation (cf. Figure 5). Le sujet se positionne assis, avec une flexion de hanche et de genoux à 90°, le TB attaché en nœud sous la tête du premier métatarse avec l'autre extrémité attachée en nœud autour d'un point fixe. La longueur du TB de 25 (cm) correspond à la distance libre d'allongement entre les deux nœuds. En fonction de son stade de progression, le sujet doit, au moyen d'un ruban mètre au sol, se positionner à l'endroit correspondant au pourcentage d'élongation du TB (cf. Figure 5).

Par exemple, un sujet travaillant à 75% de la couleur verte doit se positionner à 43.75 soit 44 (cm) sur le ruban mètre puis effectuer le mouvement dans toute l'amplitude possible.

4. Schéma expérimental

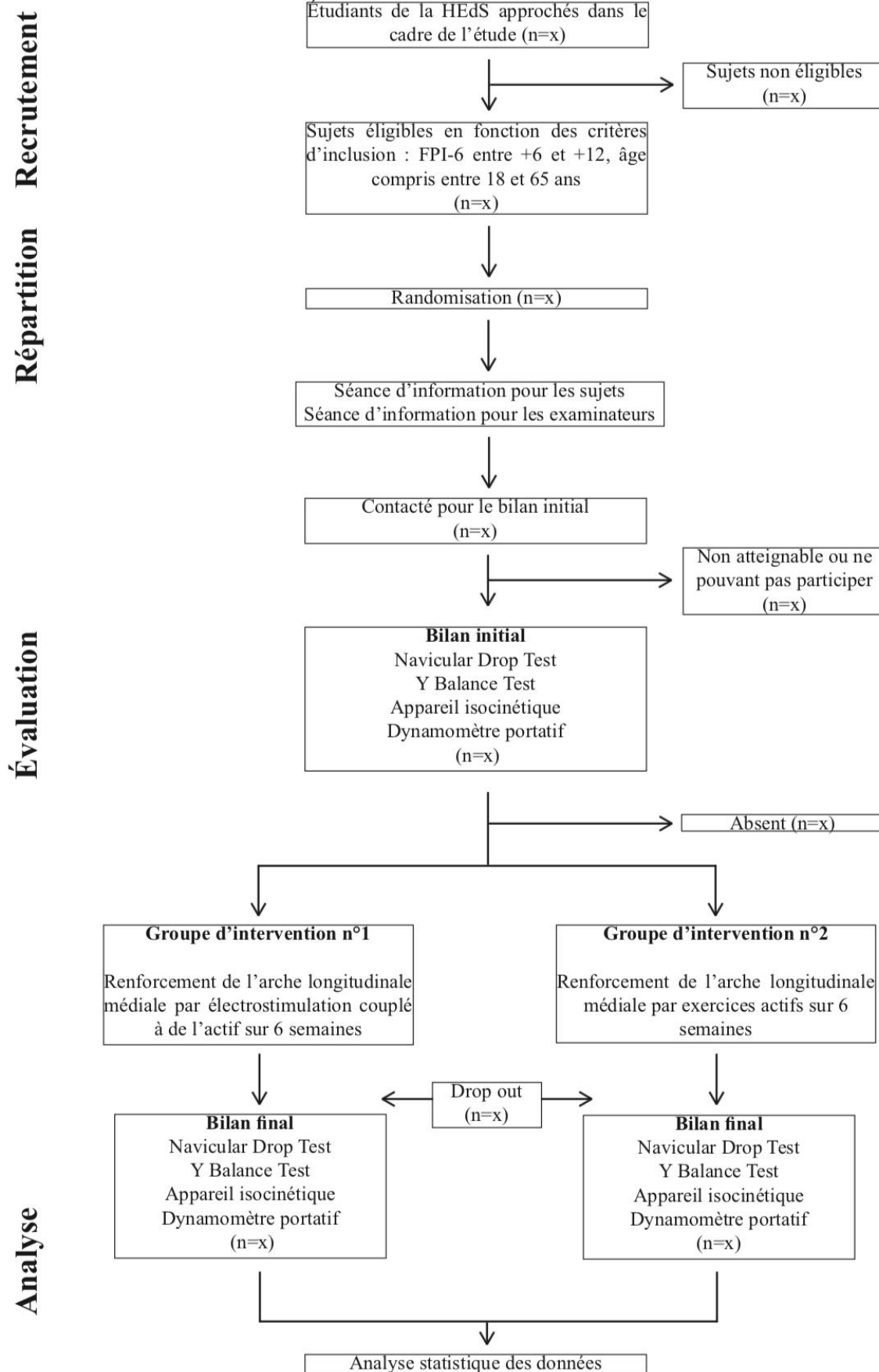


Figure 7. Flow-Chart de l'étude

5. Statistiques

5.1 Taille de l'échantillon

Le calcul de la taille de l'échantillon a été réalisé à l'aide du logiciel G*power 3.0.10. Une taille de l'effet de 0.91 a été calculée à partir des moyennes et des écarts types de l'article de Ebrecht & Sichtung (2018). Ce protocole propose un renforcement de huit semaines des MIP. Les sujets sont divisés en trois groupes ; électrostimulation, contrôle (aucune intervention) et un groupe contrôle (course à pied avec chaussures minimalistes). Dans le cadre de ce calcul, les valeurs utilisées sont celles du groupe électrostimulation et du groupe contrôle n'effectuant aucune intervention. Une puissance de 0.90 et un $p < 0.05$ sont fixés pour la réalisation de ce calcul. Ce dernier indique donc une taille d'échantillon totale de 54 sujets. En prévision des potentiels drop-outs d'environ 10%, un nombre total de 60 sujets est recommandé, soit 30 sujets par groupe.

5.2 Objectifs liés à l'outcome primaire

Objectif principal

Évaluer l'impact de l'ajout d'électrostimulation à un renforcement musculaire actif versus renforcement musculaire actif seul sur la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT chez des sujets sains

H1 : Il y a une différence significative au niveau de la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT entre le groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs et le groupe actif seul après six semaines de renforcement musculaire.

H0 : Il n'y a pas de différence significative au niveau de la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT entre le groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs et le groupe actif seul après six semaines de renforcement musculaire.

Objectifs secondaires

Évaluer l'effet d'un programme de renforcement musculaire par l'électrostimulation couplée à des exercices actifs sur la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT chez des sujets sains

H1 : Il y a une différence significative au niveau de la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT entre avant et après six semaines de renforcement par l'électrostimulation couplée à des exercices actifs.

H0 : Il n'y a pas de différence significative au niveau de la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT entre avant et après six semaines de renforcement de l'arche longitudinale médiale par l'électrostimulation couplée à des exercices actifs.

Évaluer l'effet d'un programme de renforcement actif chez des sujets sains sur la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT

H1 : Il y a une différence significative au niveau de la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT entre avant et après six semaines de renforcement musculaire de l'arche longitudinale médiale par des exercices actifs.

H0 : Il n'y a pas de différence significative au niveau de la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT entre avant et après six semaines de renforcement de l'arche longitudinale par le renforcement musculaire par des exercices actifs.

Évaluer la différence de l'effet de deux différents traitements sur la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT, soit un programme de renforcement via électrostimulation couplée à des exercices actifs et un programme de renforcement actif

H1 : Il y a une différence significative au niveau de la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT entre l'effet du traitement de renforcement via l'électrostimulation couplée à des exercices actifs de six semaines et l'effet d'un traitement uniquement d'exercices actifs de six semaines.

H0 : Il n'y a pas de différence significative au niveau de la stabilité de l'ALM mesurée par le NDT entre les deux traitements, soit le programme de renforcement via l'électrostimulation couplée à des exercices actifs et un programme de renforcement actif pendant six semaines.

Les objectifs et les hypothèses liés aux outcomes secondaires sont en Annexe II. La figure ci-dessous schématise la temporalité des différents objectifs de l'outcome primaire.

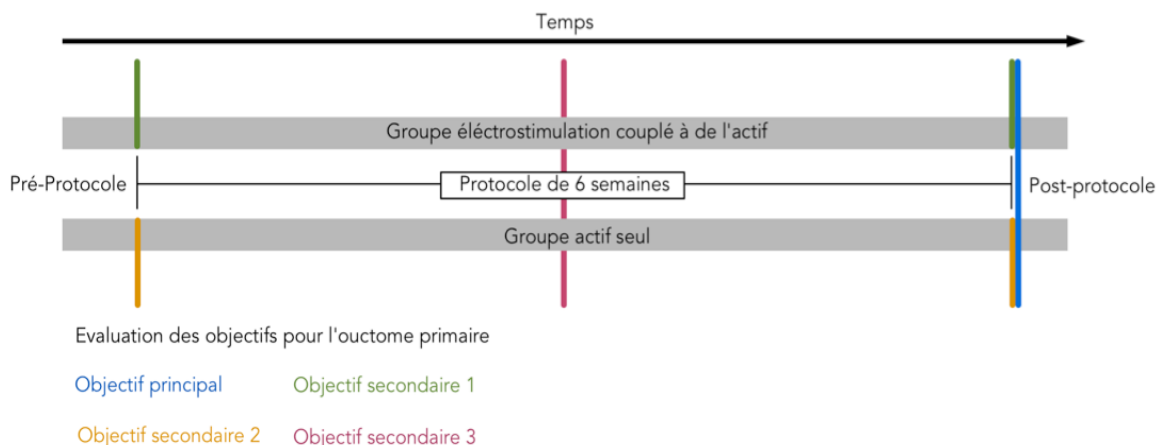


Figure 8. Temporalité des objectifs

5.3 Traitement des données

5.3.1 Statistiques descriptives

Les variables continues seront décrites sous forme de moyenne +/- écart type ainsi que les valeurs minimales et maximales. Concernant les variables dichotomiques, le sexe sera exprimé en fréquence, soit en pourcentage.

5.3.2 Statistiques inférentielles

Si les données suivent une distribution normale et que le nombre de sujets est supérieur à 25, l'utilisation des tests paramétriques est possible. Ainsi, le test utilisé afin de répondre à l'objectif principal sera le t-test non pairé. Concernant les questions secondaires : pour la première et la deuxième question, le test utilisé sera le t-test pairé. Enfin, pour la troisième question le test de t-test non pairé sera à nouveau utilisé.

6. Aspects éthiques

6.1 Risque pour les participants

Ce protocole n'est pas composé d'acte invasif, malgré l'électrostimulation qui peut être une modalité mal tolérée. Il sera donc important de bien respecter les précautions d'usage à l'électrostimulation afin d'éviter une prise de risque potentielle.

6.2 Protection des données

Les données récoltées ne seront utilisées que dans le cadre du travail de Bachelor des étudiants 3^{ème} année qui mettront en pratique ce protocole. Ces données seront codées pour éviter la reconnaissance des participants puis elles seront stockées sur des serveurs informatiques protégés par des mots de passe.

Les personnes en possession des informations concernant chaque sujet seront :

- Deux étudiants examinateurs de 3^{ème} année en stage au cabinet des Caroubiers ;
- Deux étudiants thérapeutes de 3^{ème} année réalisant le protocole.

Chacune de ces personnes devra signer une feuille de confidentialité afin d'éviter de divulguer des informations concernant les patients (cf. Annexe III).

6.3 Commission d'éthique

Dans le cadre de la réalisation de ce protocole, une demande à la commission d'éthique de Genève (Commission Cantonale d'éthique de la recherche sur l'être humain (CCER)) sera soumise.

7. Événements indésirables

Plusieurs événements indésirables pourraient avoir lieu durant cette étude. Premièrement, il est possible que des accidents et blessures surviennent durant les séances du protocole, les sujets étant seuls lors des séances.

Dans le cas présent, il faudra prévenir les deux thérapeutes dans un délai de 24h. Les sujets devront quitter le protocole afin d'éviter des possibles biais et leurs données ne seront pas prises en compte dans la récolte de celles-ci. Deuxièmement, cette étude propose des traitements exigeant du matériel spécifique, principalement pour le groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs. Il est envisageable que certains sujets développent des allergies/réactions aux produits tels que le tape ou le gel des électrodes. Il sera donc vérifié lors du recrutement et de l'évaluation des critères d'exclusion, si les sujets ont connaissance de certaines de ces réactions allergiques.

8. Aspects financiers

Afin de pouvoir réaliser le protocole, plusieurs achats devront être effectués (cf. Annexe VIII). Concernant le reste du matériel, il se trouve déjà au sein de l'école de physiothérapie. Une demande de financement sera effectuée auprès de la HEdS filière physiothérapie afin de permettre l'achat du matériel nécessaire :

- Rouleau Theraband couleur jaune, rouge, vert, bleu, noir, argent et or (x7) ;
- Rouleau de k-tape (x2) ;
- Ruban mètre (x27).

Un montant d'environ 400 CHF est estimé pour le matériel ci-dessus. De plus, la demande de fonds couvrira également les frais additionnels à la mise en place d'un protocole (commission d'éthique, publication, monitoring).

9. Récolte des données

Suite au test d'inclusion, les résultats seront retranscrits par les thérapeutes de manière informatisée et rendus anonymes sur une base de données sécurisée. Ensuite, les examinateurs, soit les stagiaires du cabinet des Caroubiers, exécuteront les différents tests initiaux et finaux. Les résultats recueillis seront retranscrits sur la même base de données informatique. Par ailleurs, un formulaire sera élaboré au préalable avec les noms des sujets codés ainsi que les différents tests à effectuer sous forme de tableau (cf. Annexe IX). Ainsi, les examinateurs pourront retranscrire les différentes valeurs relevées dans les cases correspondantes.

10. Discussion

Cette étude, randomisée contrôlée, est à notre connaissance, la première à inclure les MEP en plus des MIP dans un protocole de renforcement de l'ALM.

L'objectif est de comparer deux prises en charges différentes (électrostimulation couplée à des exercices actifs et d'actif uniquement) afin de mettre en évidence la supériorité d'une intervention par rapport à l'autre. Cette étude permettra d'évaluer la stabilité, l'équilibre dynamique et la force chez un sujet sain, après un renforcement de six semaines des MIP et MEP. La mise en place de ce protocole permettra d'évaluer les bénéfices de l'ajout de l'électrostimulation à un protocole de renforcement de l'ALM.

Force de l'étude

Faisabilité de l'étude au sein de la HEdS

Une des forces de cette étude réside dans le fait qu'elle paraît faisable dans le cadre d'un futur travail de Bachelor. En effet, le choix des outils d'évaluation de la force, soit le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique, ont été décidé en fonction du matériel à disposition dans l'école tout en respectant les modalités d'évaluation de la force préconisées dans la littérature. Ensuite, la population choisie est celle des étudiants des trois volées de physiothérapie de la HEdS. Ce choix renforce la faisabilité de l'étude pour plusieurs raisons. Les étudiants, par l'intérêt pouvant être porté au sujet ainsi que leurs connaissances théoriques et pratiques rendent le déroulement du protocole plus accessible qu'avec une population plus diversifiée.

Concernant l'organisation, en accord avec l'école, les étudiants examinateurs devront avoir quatre jours de libre sur leur « agenda patient » lors de leur stage au cabinet des Caroubiers. Le fait que ces derniers soient présents physiquement à l'école permet une supervision de la part des professeurs et des assistants de la filière. La réalisation de ce protocole semble faisable au sein de la HEdS en termes de temps disponible des collaborateurs, du matériel et de l'organisation.

Choix des outcomes et tests selon les recommandations de la littérature

Il a été choisi, dans le cadre de cette étude, d'évaluer la stabilité via le NDT comme outcome principal. En effet, ce test largement décrit dans la littérature, est utilisé dans la grande majorité des protocoles de renforcement des MIP (Ebrecht & Sichting (2018) ; Fourchet et al., (2009) ; Kim & Kim (2016) ; Mulligan & Cook (2013) ; Okamura et al. (2009)).

En revanche, l'équilibre dynamique semble peu évalué dans la littérature malgré son importance dans la fonctionnalité de l'ALM (Kim & Kim, 2016). Cette étude évalue ce paramètre via le YBT et révèle une amélioration significative. Il a donc été décidé d'inclure cet outcome dans cette étude.

Concernant la force, comme discuté ci-dessous, il existe très peu de méthode d'évaluation directe de cette dernière, notamment sur les MIP. De ce fait, plusieurs articles ont ainsi préféré évaluer l'épaisseur (cross sectional area) des MIP via l'utilisation d'une machine à ultrasons (Ebrecht & Sichting (2018) ; Okamura et al., (2009)). Cependant, dans une volonté de proposer une modalité d'évaluation de la force avec du matériel facilement disponible à l'école, il a été choisi d'utiliser le dynamomètre portatif pour les MIP ainsi que l'appareil isocinétique pour les MEP. L'appareil isocinétique, possède une fiabilité (CCI = 0.92-0.96) excellente par son positionnement facilement reproductible en comparaison au dynamomètre manuel, autre outil permettant d'évaluer la force des MEP, qui nécessite un positionnement précis afin d'être reproductible (Kaminski, 2001 ; Wong et al., 2015).

En conclusion, la littérature met en lumière l'analyse de plusieurs paramètres possibles avec une prédominance importante de la stabilité via le NDT, qui s'avère être le test de référence. Ainsi, les outcomes et leurs tests respectifs proposés dans le cadre de cette étude semblent être les plus en accord avec la littérature et les plus recommandés.

Aveuglement

L'aveuglement des examinateurs a été décidé afin de minimiser le risque de biais. En effet, ceux-ci n'auront pas connaissance de l'attribution des sujets aux groupes d'interventions lors de la réalisation des bilans d'entrée et de sortie.

Utilisation du TB

La progression des exercices avec TB a été décidée spécifiquement pour ce protocole et n'est pas tirée directement de la littérature, par faute de méthode décrite. Afin de proposer une méthode de progression adaptée à ce protocole, il a été décidé de s'inspirer de l'article d'Uchida et al., (2016). Ce procédé n'étant pas validé dans la littérature, la création de cette méthode pourrait s'avérer être un éventuel biais dans la réalisation de cette étude. Cependant, la force de cette méthode est de proposer un entraînement et une progression adaptée à chaque sujet, en fonction du muscle ciblé et de sa force.

Limites de l'étude et biais

Choix méthodologiques

Les thérapeutes ainsi que les examinateurs seront des étudiants de 3^{ème} année et non pas des physiothérapeutes diplômés, et de ce fait, moins expérimentés. Il serait donc pertinent d'avoir un suivi régulier de la part des assistants de la filière et dans la mesure du possible, des directeurs du travail de Bachelor, afin de vérifier le bon déroulement de l'étude.

Ensuite, les sujets participant à l'étude auront connaissance de leur propre intervention de renforcement, mais n'auront hypothétiquement pas connaissance du contenu du protocole de l'autre groupe d'intervention. Cela dit, la structure de l'école ainsi que le nombre d'étudiants relativement restreint au sein de la filière, favorise le partage d'informations au sein des groupes. C'est pour cette raison, et afin d'éviter tout biais, qu'il a été décidé d'ajouter une clause de confidentialité dans la feuille de consentement.

Concernant l'aveuglement, il est impossible que les thérapeutes ne connaissent pas le contenu des protocoles des deux groupes, puisque ces derniers les suivent tout au long des six semaines (séance d'informations, intervention, suivi). De par la nature de ce protocole, les sujets ont obligatoirement connaissance du type d'intervention et ne sont donc pas à l'aveugle non plus.

Par ailleurs, les modalités d'intervention proposées dans le cadre de ce protocole sont très précises et demandent aux sujets de constamment s'évaluer et augmenter la difficulté du travail avec des consignes détaillées. De plus, les séances hebdomadaires sont effectuées sans qu'il soit possible pour les thérapeutes d'être présents, c'est pourquoi une mauvaise progression des exercices ou des mouvements/compensations pourrait survenir. Cet éventuel biais sera pallié par un suivi hebdomadaire via un e-mail (décrit au chapitre 3.1).

Dans cette étude, il a été décidé de réaliser les interventions uniquement sur le pied dominant. Cependant, le pied dominant du sujet peut ne pas être celui présentant l'arche la plus affaissée (FPI-6 compris entre +6 et +12). Dans ce cas-là, ces sujets ne seront pas inclus dans l'étude.

La force des MIP via le dynamomètre portatif et des MEP via l'appareil isocinétique

La force des MIP peut-être mesurée de façon directe ou indirecte (Soysa et al., 2012). Les valeurs directes relevées permettent d'évaluer la force musculaire en comparaison aux manières indirectes, qui ne sont capables que d'estimer la structure musculaire (diamètre et volume) (Soysa et al., 2012). En effet, selon cette étude, il ressort des techniques telles que l'imagerie par résonance magnétique, tomographie informatisée, ultrasonographie, électromyographie et une biopsie musculaire. Ces méthodes indirectes sont très peu applicables en clinique en raison du matériel requis et des compétences nécessaires à l'utilisation de ces appareils.

Comme décrit plus haut, le matériel étant limité dans le cadre de la HEdS, il a fallu trouver les moyens directs, adéquats et peu coûteux pour évaluer la force des MIP et des MEP. Pour les MIP, il a été décidé d'utiliser le dynamomètre portatif. En effet, suite à plusieurs recherches dans la littérature, il a été choisi d'utiliser cet appareil pour évaluer la force des MIP décrit au chapitre 3.7.3. Cependant, l'évaluation de la force de l'ABD de l'hallux n'étant pas décrite dans la littérature, il a été difficile de trouver de quelle manière évaluer ce muscle de manière précise. C'est pourquoi, en s'inspirant de l'article de Baur (2016), la méthode d'évaluation de la force de l'ABD de l'hallux est similaire à la méthode décrite dans cet article concernant le long fléchisseur de l'hallux, tout en proposant un positionnement ainsi que des instructions au patient en adéquation avec le muscle testé.

Temps d'intervention entre les deux groupes et exercices

Au cours de l'élaboration du protocole, il a été mis en avant l'importance d'effectuer un renforcement sur une durée égale pour les deux groupes. Cependant, il a été difficile de trouver une durée qui soit égale en proposant deux modalités différentes pour le renforcement des mêmes groupes musculaires.

Concernant la temporalité, le programme de renforcement de type amyotrophique est d'une durée de 15 minutes fixe par exercice. En y ajoutant les différentes modalités (temps de repos et temps de contraction) décrites au chapitre 3.8, une durée de 45 minutes ressort pour le groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs. Le temps fixé pour le groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs étant de 45 minutes, il a été décidé de se rapprocher au mieux de ce chiffre pour le groupe actif en respectant les modalités les plus optimales de ce type de renforcement retrouvé dans la littérature.

En respectant ce principe, le temps initial de durée du groupe de renforcement actif était largement inférieur à 45 minutes. Ainsi et suite à de nombreuses discussions, il a été décidé de coupler le mouvement des fléchisseurs des orteils et de l'hallux avec le mouvement d'inversion du pied du groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs afin de diminuer le temps total et ainsi de se rapprocher le plus possible de la durée totale du groupe actif. Le fait de coupler deux muscles dans une même modalité de renforcement via électrostimulation pourrait être un éventuel biais car aucun protocole trouvé dans la littérature ne renforce deux muscles simultanément. Le groupe actif a donc une durée de 31 minutes de renforcement des MIP et MEP de l'ALM.

Concernant les exercices, en plus de la volonté d'obtenir un temps équivalent de renforcement entre les deux groupes d'intervention, il était nécessaire de respecter les modalités les plus optimales de ce type de renforcement dans la littérature. De ce fait, les exercices de l'ABD de l'hallux et les fléchisseurs des orteils du groupe actif et du groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs sont différents.

Follow-up

Selon Fourchet et al., (2009), six semaines de renforcement mettent en évidence une amélioration significative du NDT. Il a été décidé de ne pas mettre en place un follow-up pour deux raisons ; premièrement, ce protocole respecte la durée proposée selon Fourchet et al., (2009) et des résultats sont donc attendus après six semaines. Deuxièmement, la faisabilité de l'étude dans le cadre de la HEdS permet difficilement d'effectuer un follow-up durant un travail de Bachelor d'une durée d'un an.

Cependant, il pourrait être envisagé d'effectuer un follow-up sur les mois suivants l'intervention afin d'évaluer l'évolution dans le temps de la stabilité, de l'équilibre dynamique et de la force suite au protocole de renforcement.

Design de l'étude et commission d'éthique

Pour la réalisation de ce protocole, 60 sujets sont nécessaires. Cependant, ce dernier se réalisant dans le cadre d'un travail de Bachelor au sein de la HEdS et au vu du nombre important de sujets nécessaires, il pourrait être envisageable de réaliser une étude pilote, avec moins de sujets dans un premier temps. Si cette étude s'avère être probante, il serait possible de vérifier à nouveau la taille de l'échantillon avec les résultats obtenus et de reproduire ce protocole en le rendant accessibles aux collaborateurs extérieurs.

Dans ce cas, une demande à la commission d'éthique de Genève (Commission Cantonale d'éthique de la recherche sur l'être humain (CCER)) sera soumise et l'étude ne pourra pas débuter avant leur accord.

Applicabilité

La conception de ce travail a pour but de permettre à tout clinicien d'appliquer les tests du protocole. Cependant, au vu du peu de modalités d'évaluation directe de la force des MIP et MEP proposées dans la littérature, il a été décidé de choisir les méthodes les plus fiables tout en étant conscient que certains cabinets ne sont pas munis de ces divers outils (appareil isocinétique et dynamomètre portatif). De ce fait, la mise en place de ce protocole n'est pas réalisable en l'état pour toutes les structures. Cela dit, la réalisation des interventions est possible sans pour autant effectuer les tests décrits dans cette étude.

Implication clinique

Si des résultats significatifs sont mis en évidence à la suite de ce protocole, cette étude apporte une ouverture sur la compréhension du rôle de la stabilité de l'ALM dans la posture du pied. Ainsi, il serait pertinent pour les praticiens de l'intégrer à leur pratique pour une population présentant un pied en pronation avec une arche affaissée. Ce protocole pourrait également être intégré dans la rééducation de l'entorse de cheville ou d'autres pathologies associées à l'affaissement de l'ALM si des études futures sont menées dans le cadre de ces pathologies. Dépendamment des résultats, si les deux groupes révèlent des résultats significatifs, cela démontre un intérêt supplémentaire pour renforcer l'ALM via les MEP et MIP permettant ainsi de diminuer l'affaissement de l'arche. De plus, si une amélioration significative du groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs en comparaison à l'actif est relevée, il s'agirait d'une preuve supplémentaire pour renforcer l'ALM via cette modalité.

Pistes de recherches futures

Comme décrit dans le cadre théorique, aucune étude n'a été trouvée dans la littérature incluant les MEP dans le renforcement de l'ALM. Leur importance dans la fonctionnalité optimale du pied étant décrite, il a été décidé, dans le cadre de ce protocole, de les inclure au renforcement. Cependant, il serait pertinent de comparer le renforcement des MIP seuls versus le renforcement des MIP et MEP constituant l'ALM, afin d'évaluer les bénéfices de l'ajout du renforcement des MEP.

Concernant la population, il a été décidé de choisir une population saine dû au cadre de réalisation de ce protocole au sein de la HEdS. Cependant, il pourrait être pertinent de réaliser cette étude sur une population présentant une pathologie découlant d'un affaissement de l'ALM afin de comparer les résultats à une population saine. En effet, plusieurs pathologies décrites dans la littérature sont associées à un dysfonctionnement de l'ALM. La première, la fasciopathie plantaire, est une pathologie présentant une symptomatologie de douleur au talon. La manifestation de cette douleur est due à une inflammation de l'aponévrose plantaire, des contraintes répétées sur la structure et d'un déséquilibre du système suro-achilléo-calcanéo-plantaire responsable de tensions sur l'aponévrose (Huffer et al., 2017). Dans la littérature, un protocole de Soysa et al. (2012) proposant un renforcement des MIP, cite des pathologies importantes pour lesquelles il serait pertinent de proposer un renforcement de ces structures. Il cite ainsi la maladie de Charcot-Marie, une neuropathie périphérique qui provoque une atteinte des muscles distaux.

Comme discuté dans le cadre théorique, un lien entre l'affaissement de la voûte plantaire et les risques liés à la survenue d'entorse de cheville sont mentionnés dans la littérature (Mei-Dan et al., 2005 ; Baumhauer et al., 1995). Pour Baumhauer et al (1995), une arche affaissée provoque une éversion permanente et un raccourcissement des fibulaires. Ainsi, ces derniers seraient moins efficaces vis-à-vis de leur temps de réaction. C'est pourquoi, un redressement de la voûte plantaire suite au renforcement de l'ALM, provoque une modification de la posture du pied en diminuant l'éversion.

Suite à cela, les fibulaires, moins raccourcis retrouvent une fonctionnalité et permettent de mieux protéger la cheville. Une étude de Mei-Dan et al (2005), montre une survenue d'entorse plus fréquente dans le groupe présentant une arche affaissée que dans le groupe contrôle avec une arche normale. Ainsi, si ce protocole démontre des résultats probants, il serait judicieux de mettre en place ces modalités dans le cadre d'une rééducation post entorse de cheville.

Lors de futures recherches, il nous paraît pertinent de s'intéresser aux aspects qualitatifs et fonctionnels car il s'agit de paramètres très peu évalués dans la littérature. En effet, les tests utilisés dans le cadre de ce protocole sont axés sur l'aspect quantitatif. Cependant, il serait pertinent, notamment dans le YBT d'évaluer l'aspect qualitatif, autrement dit la manière de réaliser le test. Ce procédé pourrait être réalisé à l'aide d'une grille d'observation protocolée.

Concernant l'aspect fonctionnel, selon une étude de Terrier et al. (2017), on retrouve une différence significative de faiblesse des éverseurs (dans le groupe présentant une instabilité chronique de cheville en comparaison au groupe sain) lors d'une évaluation fonctionnelle et non dans le test analytique réalisé par l'appareil isocinétique. Ainsi, cette étude met en évidence l'importance d'évaluer l'aspect fonctionnel via le YBT par exemple, en parallèle à l'évaluation analytique de ces derniers.

11. Conclusion

Ce protocole a pour but d'évaluer l'impact de l'ajout de l'électrostimulation couplée à des exercices actifs sur le renforcement de l'ALM. Cette intervention sera comparée à un groupe effectuant des exercices d'actif uniquement. La stabilité, l'équilibre dynamique et la force seront évalués chez un sujet sain présentant un pied pronateur au FPI-6. Cette étude est le fruit de l'intérêt porté à l'ajout des MEP aux MIP dans un protocole de renforcement de l'ALM ainsi que de l'efficacité de l'électrostimulation couplée à des exercices actifs. Cette étude sera menée sur des sujets sains. Cependant, il serait pertinent de mettre en pratique un protocole de ce type chez une population présentant une pathologie liée à un affaissement de la voûte plantaire. Quant aux types de groupes choisis, il serait intéressant de soumettre un protocole comparant des sujets renforçant les MIP versus des sujets renforçant les MIP et MEP de l'ALM afin de comparer ce qui est le plus décrit dans la littérature face à ce qui n'a encore jamais été entrepris. Ceci permettra donc d'évaluer les bénéfices de l'ajout des MEP aux MIP dans le renforcement de l'ALM. Dépendamment des résultats obtenus, les modalités de la rééducation de l'ALM via les MEP et MIP pourront être discutées et proposées en clinique à la suite de la réalisation de cette étude.

Si les données de cette étude se montrent significatives et selon la littérature déjà effectuée sur l'entorse de cheville (Mei-Dan et al., 2005), les outils utilisés dans ce protocole permettront aux praticiens d'intégrer ce type de rééducation dans le cadre de cette pathologie.

La réalisation de ce travail a mis en évidence les difficultés quant à l'écriture d'un protocole ainsi que le temps nécessaire afin de proposer une étude pertinente et aboutie. Cette expérience permettra d'avoir un regard plus critique lors d'analyses d'articles lors de la future la pratique physiothérapeutique. Ce protocole est né de notre intérêt pour le domaine musculo-squelettique et porte sur un sujet peu mis en valeur dans la pratique.

12. Références

- Anandacoomarasamy, A., Barnsley, L. (2005). *Long term outcomes of inversion ankle injuries*. British Journal of Sports Medicine, 39(3), e14-e14.
<https://doi.org/10.1136/bjsm.2004.011676>
- Baltich, J., Emery, C. A., Stefanyshyn, D., & Nigg, B. M. (2014). *The effects of isolated ankle strengthening and functional balance training on strength, running mechanics, postural control and injury prevention in novice runners : Design of a randomized controlled trial*. BMC Musculoskeletal Disorders, 15, 407.
<https://doi.org/10.1186/1471-2474-15-407>
- Barton, C. J., Bonanno, D., Levinger, P., & Menz, H. B. (2010). *Foot and ankle characteristics in patellofemoral pain syndrome : A case control and reliability study*. The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy, 40(5), 286-296.
<https://doi.org/10.2519/jospt.2010.3227>
- Baumhauer, J. F., Alosa, D. M., Renström, A. F., Trevino, S., & Beynnon, B. (1995). *A prospective study of ankle injury risk factors*. The American Journal of Sports Medicine, 23(5), 564-570. <https://doi.org/10.1177/036354659502300508>
- Baur, C. (2016). *L'impact de la force des fléchisseurs de l'hallux sur la réception de saut, chez une population de danseurs professionnels* [Travail de Master].
- Bruyneel, A.-V., Gard, S. (2018). *Evaluation de la stabilité dynamique : Y balance test*.
<https://doi.org/10.1016/j.kine.2018.05.003>
- Collard, M. (1994). *The vestibular system : From structure to function*. La Revue Du Praticien, 44(3), 295-298.
- Coughlin, MJ., Mann, RA. (1996). *Surgery of the Foot and Ankle (7th éd.)*.
- David, P., Halimi, M., Mora, I., Doutrelot, P.-L., & Petitjean, M. (2013). *Isokinetic testing of evetor and invertor muscles in patients with chronic ankle instability*.

Journal of Applied Biomechanics, 29(6), 696-704.

<https://doi.org/10.1123/jab.29.6.696>

Drake, R. L., Vogl, A. W., Mitchell, A. W. M., Duparc, F., & Duparc, J. (2010). *Gray's Anatomie pour les étudiants*. Elsevier Masson.

Ebrecht, F., & Sichtung, F. (2018). *Does neuromuscular electrostimulation have the potential to increase intrinsic foot muscle strength ?* Foot (Edinburgh, Scotland), 35, 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.foot.2018.01.006>

Eils, E., Nolte, S., Tewes, M., Thorwesten, L., Völker, K., & Rosenbaum, D. (2002). *Modified pressure distribution patterns in walking following reduction of plantar sensation*. Journal of Biomechanics, 35(10), 1307-1313. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(02\)00168-9](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(02)00168-9)

Evans, A. M., Copper, A. W., Scharfbillig, R. W., Scutter, S. D., & Williams, M. T. (2003). *Reliability of the foot posture index and traditional measures of foot position*. Journal of the American Podiatric Medical Association, 93(3), 203-213. <https://doi.org/10.7547/87507315-93-3-203>

Feger, M. A., Snell, S., Handsfield, G. G., Blemker, S. S., Wombacher, E., Fry, R., Hart, J. M., Saliba, S. A., Park, J. S., & Hertel, J. (2016). *Diminished Foot and Ankle Muscle Volumes in Young Adults With Chronic Ankle Instability*. Orthopaedic Journal of Sports Medicine, 4(6). <https://doi.org/10.1177/2325967116653719>

Fiolkowski, P., Brunt, D., Bishop, M., Woo, R., & Horodyski, M. (2003). *Intrinsic pedal musculature support of the medial longitudinal arch : An electromyography study*. The Journal of Foot and Ankle Surgery: Official Publication of the American College of Foot and Ankle Surgeons, 42(6), 327-333. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2003.10.003>

- Fourchet, F., Kilgallon, M., Loepelt, H., & Millet, G.-P. (2009). *Électrostimulation des muscles plantaires et chute de l'os naviculaire*. Science et sports. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2009.03.005>
- Fourchet, F. (2013). *Isocinétisme et cheville : Bilans, rééducation et prévention en traumatologie*. Movement & Sport Sciences - Science & Motricité, 65-76. <https://doi.org/10.1051/sm/2013090>
- Fourchet, F., & Gojanovic, B. (2016). *Foot core strengthening : Relevance in injury prevention and rehabilitation for runners*. Swiss Sports & Exercise Medicine, 64, 26-30.
- Fourchet, F., Kuitunen, S., Girard, O., Beard, A. J., & Millet, G. P. (2011). *Effects of Combined Foot/Ankle Electromyostimulation and Resistance Training on the In-Shoe Plantar Pressure Patterns during Sprint in Young Athletes*. Journal of Sports Science & Medicine, 10(2), 292-300.
- Fraser, J. J., Feger, M. A., & Hertel, J. (2016). *Clinical commentary on midfoot and forefoot involvement in lateral ankle sprains and chronic ankle instability. Part 2 : Clinical considerations*. International Journal of Sports Physical Therapy, 11(7), 1191-1203.
- Gondin, J., Guette, M., Ballay, Y., & Martin, A. (2005). *Electromyostimulation training effects on neural drive and muscle architecture*. Medicine and Science in Sports and Exercise, 37(8), 1291-1299. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000175090.49048.41>
- Gribble, P. A., Bleakley, C. M., Caulfield, B. M., Docherty, C. L., Fourchet, F., Fong, D. T.-P., Hertel, J., Hiller, C. E., Kaminski, T. W., McKeon, P. O., Refshauge, K. M., Verhagen, E. A., Vicenzino, B. T., Wikstrom, E. A., & Delahunt, E. (2016). *2016 consensus statement of the International Ankle Consortium : Prevalence,*

- impact and long-term consequences of lateral ankle sprains*. British Journal of Sports Medicine, 50(24), 1493-1495. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096188>
- Gribble, P. A., Hertel, J., & Plisky, P. (2012). *Using the Star Excursion Balance Test to assess dynamic postural-control deficits and outcomes in lower extremity injury : A literature and systematic review*. Journal of Athletic Training, 47(3), 339-357. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-47.3.08>
- Guex, K., Daucourt, C., & Borloz, S. (2015). *Validity and reliability of maximal-strength assessment of knee flexors and extensors using elastic bands*. Journal of Sport Rehabilitation, 24(2), 151-155. <https://doi.org/10.1123/jsr.2013-0131>
- Hansen, J. T., Netter, F. H., Kamina, P., & Richer, J.-P. (2015). *Mémofiches anatomie Netter*. Elsevier Masson.
- Headlee, D. L., Leonard, J. L., Hart, J. M., Ingersoll, C. D., & Hertel, J. (2008). *Fatigue of the plantar intrinsic foot muscles increases navicular drop*. Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology, 18(3), 420-425. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2006.11.004>
- Herman, D. C., Weinhold, P. S., Guskiewicz, K. M., Garrett, W. E., Yu, B., & Padua, D. A. (2008). *The effects of strength training on the lower extremity biomechanics of female recreational athletes during a stop-jump task*. The American Journal of Sports Medicine, 36(4), 733-740. <https://doi.org/10.1177/0363546507311602>
- Huffer, D., Hing, W., Newton, R., & Clair, M. (2017). *Strength training for plantar fasciitis and the intrinsic foot musculature : A systematic review*. Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine, 24, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2016.08.008>

- Kaminski, T. W., & Dover, G. C. (2001). *Reliability of Inversion and Eversion Peak- and Average-Torque Measurements from the Biodex System 3 Dynamometer*. Journal of Sport Rehabilitation, 10(3), 205-220.
<https://doi.org/10.1123/jsr.10.3.205>
- Kapandji, A. I., & Judet, T. (2018). *Anatomie fonctionnelle 2 : Membre inférieur (7^e édition)*. Paris : Maloine.
- Kaufman, K. R., Brodine, S. K., Shaffer, R. A., Johnson, C. W., & Cullison, T. R. (1999). *The effect of foot structure and range of motion on musculoskeletal overuse injuries*. The American Journal of Sports Medicine, 27(5), 585-593.
<https://doi.org/10.1177/03635465990270050701>
- Kim, E.-K., & Kim, J. S. (2016). *The effects of short foot exercises and arch support insoles on improvement in the medial longitudinal arch and dynamic balance of flexible flatfoot patients*. Journal of Physical Therapy Science, 28(11), 3136-3139.
<https://doi.org/10.1589/jpts.28.3136>
- Kurihara, T., Yamauchi, J., Otsuka, M., Tottori, N., Hashimoto, T., & Isaka, T. (2014). *Maximum toe flexor muscle strength and quantitative analysis of human plantar intrinsic and extrinsic muscles by a magnetic resonance imaging technique*. Journal of Foot and Ankle Research, 7, 26. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-7-26>
- Lee, D.-K., Kang, M.-H., Lee, T.-S., & Oh, J.-S. (2015). *Relationships among the Y balance test, Berg Balance Scale, and lower limb strength in middle-aged and older females*. Brazilian Journal of Physical Therapy, 19(3), 227-234.
<https://doi.org/10.1590/bjpt-rbf.2014.0096>
- Maffiuletti, N. A., Cometti, G., Amiridis, I. G., Martin, A., Pousson, M., & Chatard, J. C. (2000). *The effects of electromyostimulation training and basketball practice*

- on muscle strength and jumping ability*. International Journal of Sports Medicine, 21(6), 437-443. <https://doi.org/10.1055/s-2000-3837>
- Matias, A. B., Taddei, U. T., Duarte, M., & Sacco, I. C. N. (2016). *Protocol for evaluating the effects of a therapeutic foot exercise program on injury incidence, foot functionality and biomechanics in long-distance runners : A randomized controlled trial*. BMC Musculoskeletal Disorders, 17, 160. <https://doi.org/10.1186/s12891-016-1016-9>
- McKeon, P. O., & Fouchet, F. (2015). *Freeing the foot : Integrating the foot core system into rehabilitation for lower extremity injuries*. Clinics in Sports Medicine, 34(2), 347-361. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2014.12.002>
- McKeon, P. O., & Hertel, J. (2007). *Diminished plantar cutaneous sensation and postural control*. Perceptual and Motor Skills, 104(1), 56-66. <https://doi.org/10.2466/pms.104.1.56-66>
- McKeon, P. O., Hertel, J., Bramble, D., & Davis, I. (2014). *The foot core system : A new paradigm for understanding intrinsic foot muscle function*. British Journal of Sports Medicine, 49(5), 290. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092690>
- Mei-Dan, O., Kahn, G., Zeev, A., Rubin, A., Constantini, N., Even, A., Nyska, M., & Mann, G. (2005). *The medial longitudinal arch as a possible risk factor for ankle sprains : A prospective study in 83 female infantry recruits*. Foot & Ankle International, 26(2), 180-183. <https://doi.org/10.1177/107110070502600211>
- Mulligan, E. P., & Cook, P. G. (2013). *Effect of plantar intrinsic muscle training on medial longitudinal arch morphology and dynamic function*. Manual Therapy, 18(5), 425-430. <https://doi.org/10.1016/j.math.2013.02.007>
- Munn, J., Beard, D. J., Refshauge, K. M., & Lee, R. Y. W. (2003). *Eccentric muscle strength in functional ankle instability*. Medicine and Science in Sports and Exercise, 35(2), 245-250. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000048724.74659.9F>

- Namsawang, J., Eungpinichpong, W., Vichiansiri, R., & Rattanathongkom, S. (2019). *Effects of the Short Foot Exercise With Neuromuscular Electrical Stimulation on Navicular Height in Flexible Flatfoot in Thailand: A Randomized Controlled Trial*. Journal of Preventive Medicine and Public Health = Yebang Uihakhoe Chi, 52(4), 250-257. <https://doi.org/10.3961/jpmp.19.072>
- Okamura, K., Fukuda, K., Oki, S., Ono, T., Tanaka, S., & Kanai, S. (2020). *Effects of plantar intrinsic foot muscle strengthening exercise on static and dynamic foot kinematics: A pilot randomized controlled single-blind trial in individuals with pes planus*. Gait & Posture, 75, 40-45. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.030>
- Papaiordanidou, M., Guiraud, D., & Varray, A. (2010). *Kinetics of neuromuscular changes during low-frequency electrical stimulation*. Muscle & Nerve, 41(1), 54-62. <https://doi.org/10.1002/mus.21427>
- Plisky, P. J., Gorman, P. P., Butler, R. J., Kiesel, K. B., Underwood, F. B., & Elkins, B. (2009). *The Reliability of an Instrumented Device for Measuring Components of the Star Excursion Balance Test*. North American Journal of Sports Physical Therapy : NAJSPT, 4(2), 92-99.
- Redmond, A. C., Crane, Y. Z., & Menz, H. B. (2008). *Normative values for the Foot Posture Index*. Journal of Foot and Ankle Research, 1(1), 6. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-1-6>
- Shaffer, S. W., Teyhen, D. S., Lorenson, C. L., Warren, R. L., Koreerat, C. M., Straseske, C. A., & Childs, J. D. (2013). *Y-balance test: A reliability study involving multiple raters*. Military Medicine, 178(11), 1264-1270. <https://doi.org/10.7205/MILMED-D-13-00222>

- Soysa, A., Hiller, C., Refshauge, K., & Burns, J. (2012). *Importance and challenges of measuring intrinsic foot muscle strength*. Journal of Foot and Ankle Research, 5, 29. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-5-29>
- Terada, M., Wittwer, A. M., & Gribble, P. A. (2014). *Intra-rater and inter-rater reliability of the five image-based criteria of the foot posture index-6*. International Journal of Sports Physical Therapy, 9(2), 187-194.
- Terrier, R., Fourchet, F., Degache, F., & Forestier, N. (2017). *Instabilité chronique de cheville et faiblesse des éverseurs : Comment s'affranchir des limites de l'isocinétisme en pratique clinique quotidienne ?* Kinésithérapie, la revue. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2017.02.040>
- Torre, L. F. la, Villafán-Bernal, J. R., Garmendia-Castañón, R., Franco-González, A. P., Isiordia-Espinoza, M. A., Alcalá-Zermeño, J. L., Gómez-Sánchez, E., Rodríguez-Méndez, L. M., & Sánchez-Enríquez, S. (2019). *Combination of noise plus weight-bearing accelerates consolidation time in tibial shaft fractures : A preliminary report*. Cirugia Y Cirujanos, 87(1), 18-22. <https://doi.org/10.24875/CIRU.18000315>
- Tourillon, R. (2019). *Effet d'une session d'électrostimulation de l'arche médiale du pied sur la force musculaire des muscles intrinsèques du pied, la stabilité de l'arche, la distribution statique des pressions plantaires et l'équilibre postural dynamique*. [Travail de Master]. Université de Nantes.
- Uchida, M. C., Nishida, M. M., Sampaio, R. A. C., Moritani, T., & Arai, H. (2016). *Thera-band® elastic band tension : Reference values for physical activity*. Journal of Physical Therapy Science, 28(4), 1266-1271. <https://doi.org/10.1589/jpts.28.1266>
- Weist, R., Eils, E., & Rosenbaum, D. (2004). *The influence of muscle fatigue on electromyogram and plantar pressure patterns as an explanation for the*

incidence of metatarsal stress fractures. The American Journal of Sports Medicine, 32(8), 1893-1898. <https://doi.org/10.1177/0363546504265191>

Wilson, A., & Lichtwark, G. (2011). *The anatomical arrangement of muscle and tendon enhances limb versatility and locomotor performance*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 366(1570), 1540-1553. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0361>

Wong, D. L., Glasheen-Way, M., & Andrews, L. F. (1984). *Isokinetic Evaluation of the Ankle Invertors and Evertors*. The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy, 5(5), 246-252. <https://doi.org/10.2519/jospt.1984.5.5.246>

Zuil-Escobar, J. C., Martínez-Cepa, C. B., Martín-Urrialde, J. A., & Gómez-Conesa, A. (2018). *Medial Longitudinal Arch: Accuracy, Reliability, and Correlation Between Navicular Drop Test and Footprint Parameters*. Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics, 41(8), 672-679. <https://doi.org/10.1016/j.jmpt.2018.04.001>

Annexe I : Myologie

Muscles extrinsèques

Tibial postérieur (TP) :

Insertion proximale : s'insère sur la face postérieure de la fibula, s'épand sur la membrane interosseuse au niveau médial de la jambe.

Insertion distale : se finit par son tendon sur la tubérosité de l'os naviculaire, les faces plantaires de l'os cuboïde et des os cunéiformes et enfin sur la base des 2^e, 3^e et 4^e os du métatarse.

Actions : fléchisseur plantaire et inverseur du pied.

Fonction : lors de la charge le poids est réparti sur tout le pied, il favorise également un bon équilibre lors des activités.

(Hansen, J. (2015). *Mémofighes Anatomie : Netter*. Elsevier Masson)

Long fibulaire (LF) :

Insertion proximale : s'insère sur la tête de la fibula.

Insertion distale : passe par l'arrière de la malléole externe se finit sur la base du 1^{er} métatarsien et sur le cunéiforme médial.

Actions : éversion du pied + fléchisseur plantaire du pied.

Fonction : le trajet de ce muscle favorise le maintien des trois arches du pied. (Hansen, J. (2015). *Mémofighes Anatomie : Netter*. Elsevier Masson)

Fléchisseur commun des orteils (FCO) :

Insertion proximale : face postérieure du tibia, sur la partie moyenne.

Insertion distale : passe dans la plante du pied pour se diviser en 4 bandelettes et s'insère sur la base des phalanges distales des orteils.

Actions : fléchisseur des quatre orteils, fléchisseur plantaire et participe à l'inversion du pied.

Fonction : par son trajet, ce muscle permet aux orteils de s'agripper au sol durant la marche et la course. Il aide à la tenue de l'arche médiale du pied. (Hansen, J. (2015). *Mémofighes Anatomie : Netter*. Elsevier Masson)

Long fléchisseur de l'hallux (LFH) :

Insertion proximale : s'insère sur la face postérieure de la fibula aux 2/3 inférieures, s'épand sur la membrane interosseuse.

Insertion distale : se confond avec les tendons du long fléchisseur des orteils et du tibial postérieur pour se finir sur la phalange distale de l'hallux.

Actions : fléchisseur de l'hallux et fléchisseur plantaire.

Fonction : par son trajet, ce muscle favorise la propulsion du pied lors de la marche ou de la course et il aide à la tenue de l'arche médiale du pied. (Hansen, J. (2015). *Mémofiches Anatomie : Netter*. Elsevier Masson)

Muscle intrinsèque

Abducteur de l'hallux (ABD hallux) :

Insertion proximale : processus médial de la tubérosité du calcanéum, du rétinaculum des fléchisseurs et de l'aponévrose plantaire.

Insertion distale : face médiale de base de la phalange proximale de l'hallux.

Actions : Abducteur de l'hallux (articulation métatarso-phalangienne) et fléchisseur de l'orteil. (Hansen, J. (2015). *Mémofiches Anatomie : Netter*. Elsevier Masson)

Annexe II : Objectifs et hypothèses secondaires

Objectif secondaire n° 1

Évaluer l'impact de l'ajout de l'électrostimulation à un renforcement musculaire actif vs renforcement musculaire actif seul sur l'équilibre dynamique de l'ALM mesurée par le YBT chez des sujets sains

H1 : Il y a une différence significative au niveau de l'équilibre de l'ALM mesurée par le YBT entre le groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs et le groupe actif seul après six semaines de renforcement musculaire.

H0 : Il n'y a pas de différence significative au niveau de l'équilibre dynamique de l'ALM mesurée par le YBT entre le groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs et le groupe actif seul après six semaines de renforcement musculaire.

Évaluer l'effet d'un programme de renforcement musculaire par électrostimulation couplée à des exercices actifs sur l'équilibre dynamique de l'ALM mesurée par le YBT chez des sujets sains

H1 : Il y a une différence significative au niveau de l'équilibre dynamique de l'ALM mesurée par le YBT entre avant et après six semaines de renforcement par électrostimulation couplée à des exercices actifs.

H0 : Il n'y a pas de différence significative au niveau de l'équilibre dynamique de l'ALM mesurée par le YBT entre avant et après six semaines de renforcement de l'arche longitudinale médiale par électrostimulation couplée à des exercices actifs.

Évaluer l'effet d'un programme de renforcement actif chez des sujets sains sur l'équilibre dynamique de l'ALM mesurée par le YBT

H1 : Il y a une différence significative au niveau de l'équilibre dynamique de l'ALM mesurée par le YBT entre avant et après six semaines de renforcement musculaire de l'arche longitudinale médiale par d'exercices actifs.

H0 : Il n'y a pas de différence significative au niveau de l'équilibre dynamique de l'ALM mesurée par le YBT entre avant et après six semaines de renforcement de l'arche longitudinale par le renforcement musculaire par des exercices actifs.

Évaluer la différence de l'effet de deux différents traitements sur l'équilibre dynamique de l'ALM mesurée par le YBT, soit un programme de renforcement via électrostimulation couplée à des exercices actifs et un programme de renforcement actif

H1 : Il y a une différence significative au niveau de l'équilibre dynamique de l'ALM mesurée par le YBT entre l'effet du traitement de renforcement via électrostimulation couplée à des exercices actifs de six semaines et l'effet d'un traitement uniquement d'exercices actifs de six semaines.

H0 : Il n'y a pas de différence significative au niveau de l'équilibre dynamique de l'ALM mesurée par le YBT entre les deux traitements, soit le programme de renforcement via électrostimulation couplée à des exercices actifs et un programme de renforcement actif pendant six semaines.

Objectif secondaire n° 2

Évaluer l'impact de l'ajout de l'électrostimulation à un renforcement musculaire actif vs renforcement musculaire actif seul sur la force des muscles intrinsèques et extrinsèques de l'ALM mesurée par le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique chez des sujets sains

H1 : Il y a une différence significative au niveau de la force des muscles intrinsèques et extrinsèques de l'ALM mesurée par le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique entre le groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs et le groupe actif seul après six semaines de renforcement musculaire.

H0 : Il n'y a pas de différence significative au niveau de la force des muscles intrinsèques et extrinsèques de l'ALM mesurée par le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique entre le groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs et le groupe actif seul après six semaines de renforcement musculaire.

Évaluer l'effet d'un programme de renforcement musculaire par électrostimulation couplée à des exercices actifs sur la force des muscles intrinsèques et extrinsèques de l'ALM mesurée par le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique chez des sujets sains

H1 : Il y a une différence significative au niveau de la force des muscles intrinsèques et extrinsèques de l'ALM mesurée par le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique entre avant et après six semaines de renforcement par électrostimulation couplée à des exercices actifs.

H0 : Il n'y a pas de différence significative au niveau de la force des muscles intrinsèques et extrinsèques de l'ALM mesurée par le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique entre avant et après six semaines de renforcement de l'arche longitudinale médiale par électrostimulation couplée à des exercices actifs.

Évaluer l'effet d'un programme de renforcement actif chez des sujets sains sur la force des muscles intrinsèques et extrinsèques de l'ALM mesurée par le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique

H1 : Il y a une différence significative au niveau de la force des muscles intrinsèques et extrinsèques de l'ALM mesurée par le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique entre avant et après six semaines de renforcement musculaire de l'arche longitudinale médiale par d'exercices actifs.

H0 : Il n'y a pas de différence significative au niveau de la force des muscles intrinsèques et extrinsèques de l'ALM mesurée par le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique entre avant et après six semaines de renforcement de l'arche longitudinale par le renforcement musculaire par des exercices actifs.

Évaluer la différence de l'effet de deux différents traitements sur la force des muscles intrinsèques et extrinsèques de l'ALM mesurée par le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique, soit un programme de renforcement via électrostimulation couplée à des exercices actifs et un programme de renforcement actif

H1 : Il y a une différence significative au niveau de la force des muscles intrinsèques et extrinsèques de l'ALM mesurée par le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique entre l'effet du traitement de renforcement via électrostimulation couplée à des exercices actifs de six semaines et l'effet d'un traitement uniquement d'exercices actifs de six semaines.

H0 : Il n'y a pas de différence significative au niveau de la force des muscles intrinsèques et extrinsèques de l'ALM mesurée par le dynamomètre portatif et l'appareil isocinétique entre les deux traitements, soit le programme de renforcement via électrostimulation couplée à des exercices actifs et un programme de renforcement actif pendant six semaine.

Annexe III : Formulaire de consentement et de confidentialité

« L'impact sur la stabilité, l'équilibre dynamique et la force des muscles constituant l'arche longitudinale médiale du pied par le renforcement via électrostimulation couplée à des exercices actifs versus renforcement actif : protocole pour une étude clinique »

En signant ce formulaire, vous affirmez :

- ❖ Avoir accepté de participer à l'étude susmentionnée
- ❖ Avoir reçu et saisi les informations orales et écrites nécessaires sur le déroulement du protocole et ses objectifs
- ❖ Avoir eu suffisamment de temps de réflexion avant de donner votre consentement
- ❖ Avoir reçu une réponse à toutes vos questions
- ❖ Avoir été averti(e) de votre droit à refuser le protocole sans préjudices /dommage d'aucune sorte
- ❖ Avoir été informé(e) que les données récoltées sont conservées pour une durée de dix ans et seuls les thérapeutes/examineurs y ont accès dans leur intégralité
- ❖ Vous vous engagez à ne pas divulguer la nature du protocole de renforcement du groupe dans lequel vous êtes assigné(e)s

Participant(e) :

Genève, le.....

Signature du/de la participant(e) :

Annexe IV : Tableaux récapitulatifs des tests

Tests		Justification
Stabilité de l'arche longitudinale médiale	Navicular Drop Test	CCI* : inter-examineur = 0,94 IC** : 95% ; 0.89-0.97 CCI : intra-examineur = 0.91 IC : 95% ; 0.84-0.95 <i>Zuil-Escobar (2018)</i> Population saine 18-35 ans <i>Barton et al., (2010)</i>
Équilibre dynamique de l'arche longitudinale médiale	Y Balance Test	CCI : inter-examineur = 0,99 IC : 95% ; 0.96-0.99 CCI : intra-examineur = 0,89 IC : 95% ; 0.69-0.96 Population d'adulte <i>(Plisky et al., 2009)</i>
Force des muscles intrinsèques du pied	Dynamomètre portatif	CCI : inter-examineur = 0,82 - 0.88 CCI : intra-examineur = 0.98 <i>Soysa et al., (2012)</i>
Force des muscles extrinsèques du pied	Appareil isocinétique	CCI: inter-examineur = 0.96 <i>Wong & al., (2015)</i> CCI: intra-examineur = 0.92 <i>Kaminski (2001)</i>

* CCI : Coefficient de corrélation intra-classe

** IC : Intervalle de confiance

Annexe V : Tableau d'intervention du groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs

Groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs	Exercices	Muscles visés	Installation du patient
	Short foot	Muscle intrinsèque du pied : Abducteur de l'hallux	Station debout en charge 2 électrodes positionnées en dessous de la tête du 1 ^{er} métatarse
	Mouvement d'inversion combiné à un mouvement de flexion des orteils et de l'hallux	Tibial postérieur + fléchisseur commun des orteils + long fléchisseur de l'hallux	Patient assis Électrodes positionnées sur le point moteur du muscle visé = Sous la tête du talus pour les fléchisseurs des orteils et de l'hallux = Postérieur à la malléole interne pour tibial postérieur
	Mouvement d'éversion	Long fibulaire	Patient assis Position neutre du pied, électrodes positionnées sur le point moteur du muscle visé = Postérieurement à la malléole externe

Modalités

Progression : Augmenter l'intensité du courant afin de ressentir une gêne mais pas de douleur	Durée d'une série : 15 minutes
Programme : 15 minutes mode amyotrophique sur Compex	Fréquence : 3x/semaine durant 6 semaines
Intensité : Ressentir une gêne mais pas de douleur	Durée totale du renforcement électrostimulation : 45 minutes
Temps de contraction : 4 secondes	Préparation : Première séance sous supervision
Temps de repos : 8 secondes	Type de courant : Courant symétrique bi-phasique

Annexe VI : Tableau d'intervention du groupe actif

Groupe actif	Exercices	Muscles visés	Installation du patient	Progression
	Short foot	Muscle intrinsèque du pied : Abducteur de l'hallux	Station debout en charge	1 : Assis pieds au sol 2 : Debout bipodal 3 : Unipodal
	ABD des orteils	Muscle intrinsèque du pied : Abducteur de l'hallux	Station debout en charge	1 : Assis pieds au sol 2 : Debout bipodal 3 : Unipodal
	Attraper linge avec orteils	Fléchisseur commun des orteils + long fléchisseur de l'hallux	Debout, bipodal, linge sous les orteils	Augmenter l'épaisseur du linge
	Mouvement d'inversion contre TB	Tibial postérieur	Patient assis, TB positionné sous la tête du premier métatarse	c.f Tableau 3
	Mouvement d'éversion contre TB	Long fibulaire	Patient assis, TB positionné sous la tête du 5ème métatarse	c.f Tableau 3

Modalités

Nombre de répétitions : 10	Temps de repos entre chaque série : 1 minute
Nombre de séries : 4	Durée totale du renforcement actif : 31 minutes et 30 secondes
Temps total d'un mouvement : 5 secondes	Fréquence : 3x/ semaine durant 6 semaines
Temps de repos entre chaque contraction : 1 seconde	Préparation : Première séance sous supervision

Annexe VII: Tableau Theraband selon article Guex et al., (2015)

Table 1 Resistances (kg) of the Prepared Elastic Bands for Knee-Flexor and -Extensor Maximal-Strength Assessments

Thera-Band color	Number of layers	Initial length (cm)	Knee Flexors		Knee Extensors	
			Terminal length (%)	Resistance (kg)	Terminal length (%)	Resistance (kg)
Black	4	70	101	16.6	160	22.9
		65	116	18.2	180	25.0
		60	134	20.2	203	27.5
Silver	4	75	88	20.9	143	29.5
		70	101	23.0	160	32.2
		65	116	25.4	180	35.3
		60	134	28.2	203	38.9
Gold	4	55	156	31.5	231	43.2
		75	88	33.9	143	47.4
		70	101	37.2	160	51.7
		65	116	41.0	180	56.5
		60	134	45.4	203	62.3
		55	156	50.6	231	69.0
		50	181	56.9	264	77.1
		45	213	64.5	304	87.0

Note: The resistances ranged from 16.6 to 56.9 kg for the knee flexors and from 22.9 to 77.1 kg for the knee extensors.

Annexe VIII : Liste du matériel

Matériel pour les tests

Navicular Dop Test	<ul style="list-style-type: none">- Chaise avec dossier- Crayon- Règle
Y Balance Test	<ul style="list-style-type: none">- Marques au sol- (Postéro-latérale, postéro-médiale, antérieure)- Cale- Ruban mètre
Mesure de la force via le dynamomètre portable	<ul style="list-style-type: none">- Dynamomètre portable- Caisse en bois- Fil- Sangles- Coussin- Table de traitement
Mesure de la force via l'appareil isocinétique	<ul style="list-style-type: none">- Appareil isocinétique- Sangles- Goniomètre- Coussin

Groupe électrostimulation couplée à des exercices actifs	<ul style="list-style-type: none">- Un appareil d'électrostimulation par patient- Réserve d'électrodes- Réserve de tape prédécoupés- Gel
Groupe actif	<ul style="list-style-type: none">- Un linge par patient- Theraband (3 longueurs par couleur)- Ruban mètre

Annexe IX: Case report Form

Nom :

Prénom :

Date de naissance :

Taille :

Poids :

Sexe :

Allergies :

Questions

Entourez la bonne réponse

- **Avez-vous des risques de grossesse ?**

Oui Non

- **Êtes-vous connu(e) pour des pathologies cardiovasculaires ?**

Oui Non

Si oui, lesquelles ?.....

- **Êtes-vous connu(e) pour des risques d'épisodes d'épilepsie ?**

Oui Non

- **Êtes-vous connu(e) pour des risques de pathologies neurologiques ?**

Oui Non

Si oui, lesquelles ?

Signature du/ de la thérapeute.....

Signature du sujet :.....

Tableau récapitulatif des données

Pied dominant		
Foot Posture Index		
	Bilan d'entrée en date du	Bilan de sortie en date du
Navicular Drop Test		
Y Balance Test		
Force dynamomètre portatif		
Force appareil isocinétique		