

MASTER STAPS

ENTRAINEMENT ET OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE SPORTIVE

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2022-2023

MEMOIRE

TITRE : INTÉRÊT D'UN CYCLE DE RENFORCEMENT MUSCULAIRE SPÉCIFIQUE DES MUSCLES INTRINSÈQUES DU PIED POUR L'AMÉLIORATION DES TEMPS DE CONTACT AU SOL ET DES QUALITÉS PLIOMÉTRIQUES CHEZ LES COUREURS DE DEMI-FOND ET FOND EN ATHLÉTISME

PRÉSENTE PAR : LAURA HANON

SOUS LA DIRECTION DE : JÉRÉMY COQUART

SOUTENU LE 16/05/2023

DEVANT LE JURY :



« La Faculté des Sciences du Sport et de l'Éducation Physique n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les mémoires ; celles-ci sont propres à leurs auteurs. »

Remerciements

Je souhaite remercier l'ensemble des personnes qui ont rendu possible la mise en place de ce mémoire.

Je remercie d'abord le Lille Métropole Athlétisme (LMA) et notamment la section Lille Université Club (LUC) pour m'avoir accueillie de nouveau cette année. Merci au président Grégory Flotin de m'avoir renouvelé sa confiance.

Un grand merci à Etienne Mowat et Olivier Libert, entraîneurs des demi-fondeurs, sprinteurs ainsi que des jeunes qui m'ont encore beaucoup appris cette année et qui m'ont laissé énormément de libertés pour entraîner leurs groupes.

Je souhaite également remercier les athlètes du groupe demi-fond qui ont participé à mon protocole, qui ont été à la fois sérieux, investis mais également très désireux d'en apprendre davantage sur mon thème de mémoire.

Enfin, merci à Monsieur Coquart pour avoir de nouveau suivi la mise en place de mon mémoire, pour le temps qu'il m'a accordé tout au long de l'année ainsi que pour ses conseils.

Sommaire

Remerciements	3
Sommaire	4
Glossaire	5
Introduction	6
1. Revue de littérature	7
1.1 Anatomie du pied	7
1.2 Rôle du pied	9
1.3 Atrophie des muscles plantaires et performance sportive	11
2. Problématique, objectifs et hypothèses	15
2.1 Problématique	15
2.2 Objectifs	15
2.3 Hypothèses	15
3. Stage	16
3.1 Milieu professionnel	16
3.2 Sujets	17
3.3 Matériel, techniques de mesure et protocole	17
3.3.1 Matériel et techniques de mesure	17
3.3.2 Protocole	18
3.4 Analyse statistique	21
4. Résultats	22
5. Discussion	28
6. Conclusion	33
7. Références bibliographiques	34
8. Annexes	37
Annexe n°1 : tableau des résultats	37
Annexe n° 2: séances de renforcement spécifique du pied	37
Annexe n°3 : exemple de fiche retour donnée aux athlètes	39
9. Résumé	40
10. Compétences	42

Glossaire

AH	Abducteur Hallucis
FDB	Fléchisseur Digitorum Brevis
FFA	Fédération Française d'Athlétisme
FSSEP	Faculté des Sciences du Sport et de l'Éducation Physique
GC	Groupe Contrôle
GE	Groupe Expérimental
IRFO	Institut des Rencontres de la Forme
LMA	Lille Métropole Athlétisme
LUC	Lille Université Club
ND	Navicular Drop
QP	Quadratus Plantae

Introduction

Dans ses activités quotidiennes, l'être humain recourt à une position de base droite et bipède. L'adoption de cette position est notamment possible grâce au pied. Celui-ci est un composant majeur du corps humain : ses structures lui confèrent la capacité de soutenir le corps et d'initier la locomotion, lors de la marche puis de la course.

En athlétisme, le pied peut être considéré comme un facteur de performance. Il s'agit du premier support de l'athlète : c'est lui qui permet à l'athlète d'être en contact avec le sol, d'accélérer, de décélérer, de sentir les surfaces et les déséquilibres. Le pied est par ailleurs très présent dans le vocabulaire des entraîneurs et des athlètes : « avoir du pied », « griffer à l'aide du pied » ou encore « armer son pied » sont des termes que l'on entend régulièrement sur les stades. Et pourtant, le renforcement spécifique du pied n'apparaît pas comme une priorité dans l'entraînement. On retrouve un travail de pied à travers la proprioception et à travers les gammes de course par exemple. Mais on ne retrouve que rarement des exercices de renforcement strict de ses muscles, comme l'on pourrait voir des exercices de renforcement isolés des muscles des mollets ou des quadriceps. Les facteurs de performance étant nombreux en demi-fond et fond, les entraîneurs doivent considérer l'importance de chaque facteur pour faire des choix dans leur entraînement afin d'amener leurs athlètes à progresser. On peut alors penser que les entraîneurs ne considèrent pas toujours le pied comme un élément majeur à travailler. Pour autant, les structures du pied sont en partie responsables de la capacité de l'athlète à appliquer des temps de contact au sol court, à transmettre toute sa puissance au sol ou encore à rebondir. À partir de cette analyse, je me suis donc demandée s'il n'y avait tout de même pas un intérêt à travailler spécifiquement les muscles intrinsèques du pied dans le but d'améliorer les capacités de ceux-ci : les athlètes n'y gagneraient-ils pas à renforcer les muscles de leur pied afin qu'ils profitent de toute leur efficacité musculaire ?

Ainsi, c'est à travers ce questionnement que j'ai voulu travailler sur le renforcement spécifique des muscles du pied en athlétisme. Dans ce mémoire, nous aborderons dans un premier temps l'anatomie du pied ainsi que son rôle chez l'être humain lors de la locomotion. Nous évoquerons également l'influence du port de chaussures sur l'anatomie du pied et sur l'efficacité de ses muscles. Enfin, nous nous attarderons sur son rôle en demi-fond et fond. À travers le protocole que nous allons mettre en place, nous chercherons à déceler son niveau d'importance dans la réalisation d'une performance en demi-fond et fond. Nous tenterons donc de montrer l'influence que peut avoir le renforcement des muscles du pied sur certains facteurs de course. Ce mémoire aura pour but de faire avancer le monde de l'entraînement en athlétisme en recueillant des informations sur une thématique peu abordée à l'heure actuelle.

1. Revue de littérature

Le pied est considéré comme « *la structure la plus sophistiquée* » (Captier et al., 2003) du corps humain. Aujourd'hui encore, tous ses secrets ne sont pas connus. De nombreux auteurs s'attardent à décrire son anatomie ainsi que son rôle exact dans le corps humain. Malgré cela, il est possible d'attester que le pied est un élément essentiel dans la performance, notamment en athlétisme : il s'agit du seul membre qui relie le sportif au sol. Par ailleurs, on analyse ses propriétés de façon régulière chez les athlètes : temps de contact au sol et force appliquée sont par exemple des indicateurs forts pour la performance sportive. Pour autant, dans le monde de l'entraînement, on cherche à améliorer les capacités du pied en ne s'y attardant spécifiquement que rarement.

L'objectif du travail réalisé dans ce mémoire est donc de questionner l'utilité d'un renforcement spécifique des muscles du pied dans un but d'amélioration de la performance sportive.

1.1 Anatomie du pied

La bipédie est apparue chez l'Homme il y a plusieurs millénaires. Ce mode de locomotion a poussé le pied à changer et à se former tel que nous le connaissons aujourd'hui. Ainsi, en position debout, les pieds sont devenus notre seul point de contact avec le sol.

L'anatomie du pied est complexe : c'est une petite partie du corps dans laquelle est regroupé un ensemble d'os, de ligaments, d'articulations et de muscles. Ces éléments forment un ensemble capable de s'organiser pour propulser le corps vers l'avant (Marieb et Hoehn, 2015).

D'un point de vue musculaire, on distingue différentes catégories de muscles au niveau des pieds : les muscles intrinsèques et les muscles extrinsèques du pied. Ils se différencient notamment par leurs origines et leurs insertions. Les muscles intrinsèques ont leurs origines et insertions dans le pied, tandis que l'origine des muscles extrinsèques, comme leur nom l'indique, se situe dans la jambe (Kelly et al., 2015). Les muscles intrinsèques sont divisés en deux catégories : les muscles plantaires disposés sur quatre couches et les muscles dorsaux disposés sur deux couches. La première couche de muscles plantaires, dite superficielle, comprend les muscles suivants : l'abducteur de l'hallux, le court fléchisseur des orteils et l'abducteur du cinquième orteil (Fig.1A) (Marieb et Hoehn, 2015). Ces muscles sont également appelés respectivement abducteur hallucis, flexor digitorum brevis et abducteur digiti minimi dans la littérature scientifique (Soysa et al., 2012). La deuxième couche est composée du carré plantaire, ou quadratus plantae et des lombricaux (Fig. 1B) (Soysa et al., 2012 ; Marieb et Hoehn, 2015). La troisième couche comprend les adducteurs de l'hallux transversal et oblique, le court fléchisseur de l'hallux et le court fléchisseur du troisième orteil (Fig. 1C), aussi appelés adducteur hallucis transversal, adducteur hallucis oblique, flexor hallucis brevis et flexor digiti minimi brevis (Soysa et al., 2012 ; Marieb et Hoehn, 2015). Enfin, la couche dite profonde est constituée des trois muscles interosseux

plantaires, dits interossei plantaires dans la littérature (Fig. 1D) (Soysa et al., 2012 ; Marieb et Hoehn, 2015). Selon Marieb et Hoehn (2015), de façon générale, les muscles intrinsèques du pied participent à « la flexion, à l'extension, à l'abduction et à l'adduction des orteils ». Ils participent également au soutien de l'arche plantaire.

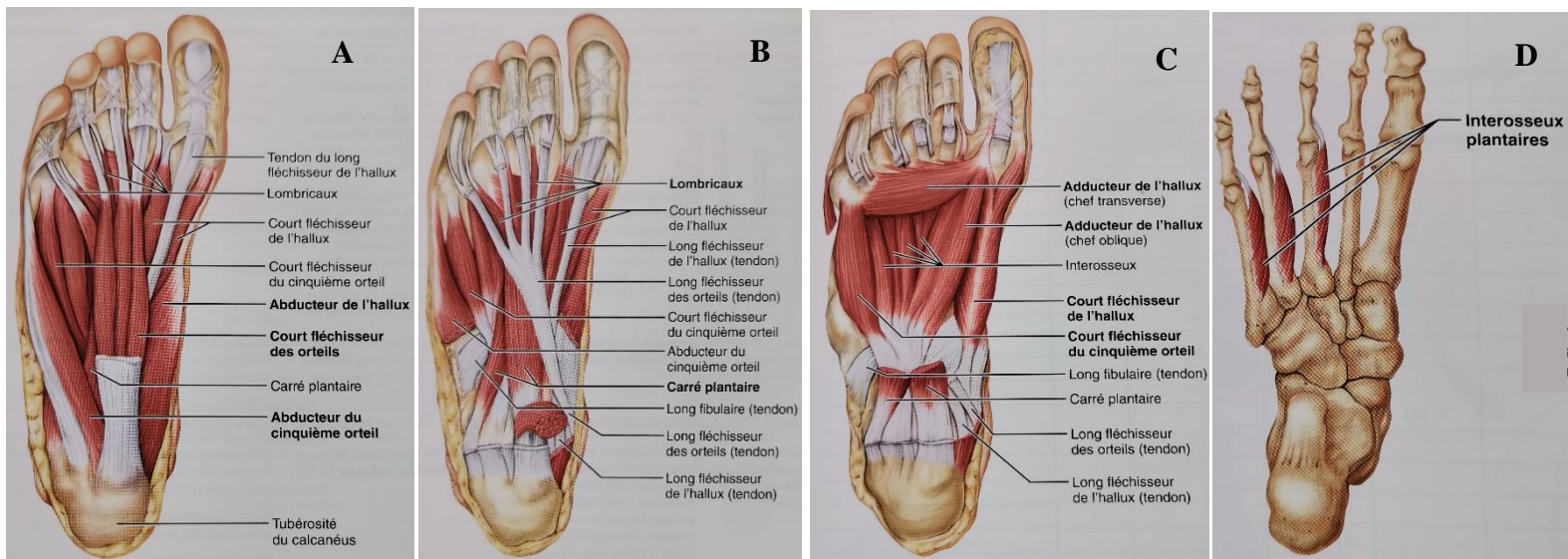


Figure 1 : Muscles du pied droit, face plantaire – **A** : première couche ; **B** : deuxième couche ; **C** : troisième couche ; **D** : quatrième couche (Marieb et Hoehn, 2015)

Selon Kelly et al. (2015), les trois muscles intrinsèques du pied les plus importants sont l'abducteur de l'hallux, le court fléchisseur des orteils et le carré plantaire (Fig. 2). Ils stipulent que leur grosseur est plus importante que les autres muscles et que leur trajet « s'étendant sur toute la longueur [de l'arche médiale] et suivant des voies anatomiques similaires aux glissements médiaux et centraux de l'aponévrose plantaire » leur confère un rôle des plus importants. Ils participeraient davantage à la rigidité de l'arche plantaire et à la restitution d'énergie (Kelly et al., 2015).

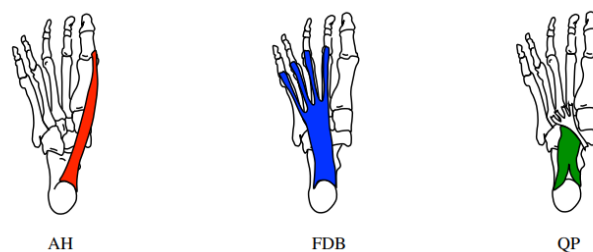


Figure 2 : Représentation schématique des trajets anatomiques des muscles abducteur hallucis (AH, en rouge), fléchisseur digitorum brevis (FDB, en bleu) et quadratus plantae (QP, en vert). (Kelly et al., 2015)

1.2 Rôle du pied

Le pied possède différents rôles. Lors de la station debout, il « assure la stabilité générale du corps » (Captier et al., 2003) et permet ainsi à l'être humain de s'équilibrer. Cet équilibre s'acquiert au cours du temps, il n'est pas inné. Celui-ci est d'ailleurs possible grâce à la voûte plantaire dont la position est solidement maintenue par l'aponévrose plantaire lors de la station debout (Soysa et al., 2012). Lors de la marche, le rôle du pied s'intensifie. La marche est définie comme « la combinaison dans le temps et l'espace de mouvements plus ou moins complexes des différents segments du corps aboutissant au déplacement de l'individu sur un plan horizontal » (Prevost et Reiss, 2020). Elle incorpore donc une notion d'équilibre dynamique, de coordination des membres du corps et une notion de contraintes auxquelles l'individu doit faire face. Ainsi, pour répondre aux besoins de la marche, le pied va mettre en action son « triple rôle d'amorti, d'équilibre, ainsi que de stabilisation et de progression lors du déroulement du pas » (Dedieu, 2020). Pour répondre à ces différents rôles, il doit posséder les qualités suivantes : il doit être déformable, permettre l'amortissement notamment par les parties molles du pied et être apte à transmettre la force par restitution d'énergie (Dedieu, 2020).

Dans le cadre de la locomotion, que ce soit pour la marche ou pour la course, les structures passives du pied sont mises en jeu afin de stocker de l'énergie. Le stockage d'énergie s'effectue lors de la première phase d'appui du pied au sol (Ker et al., 1987). On parle d'énergie de déformation. En effet, cette énergie peut être stockée grâce à la déformation de la voûte plantaire longitudinale interne, également appelée arche médiale. Celle-ci possédant des caractéristiques élastiques, elle agit comme un ressort. C'est grâce à ses propriétés rigides qu'elle se comprime puis se détend à chaque pas, permettant de créer un levier de propulsion (Holowka et al., 2018 ; Blaise, 2021). Puis, l'énergie est restituée lors de la deuxième phase d'appui (Ker et al., 1987) afin de permettre la propulsion du pied vers le haut et vers l'avant : c'est ce qui rend possible la locomotion. Les propriétés élastiques de l'arche médiale permettraient également le transfert de force des membres inférieurs au sol, et inversement. De nombreuses études attestent que ce sont les structures passives du pied, c'est-à-dire les tendons (Captier et al., 2003) et aponévroses (Ker et al., 1987) qui travaillent dans cette restitution d'énergie. Cette croyance a longtemps été actée, que ce soit pour la marche ou pour la course. En 1987, Ker et al. expliquent par exemple que « la voûte plantaire stocke suffisamment d'énergie de déformation pour rendre la course plus efficace sur le plan énergétique ». Finalement, les muscles du pied auraient pour rôle principal le maintien de l'arche plantaire. Or, depuis quelques années maintenant, des auteurs tels que Riddick et al. (2019) tentent de mettre en avant le fait que les muscles du pied ne servent pas seulement à « rigidifier » (Riddick et al., 2019) l'arche plantaire, mais jouent également un rôle direct dans la locomotion. En effet, la capacité des structures passives à se déformer pour stocker et restituer l'énergie ne serait pas suffisante pour faire face à l'augmentation de la vitesse que nécessite la course.

Dans La Nouvelle Bible de la Préparation Physique, Prévost et Reiss (2020) différencient la marche et la course grâce à deux caractéristiques : la course est « *une succession de foulées bondissantes* », c'est-à-dire qu'elle ne possède pas de phase de double appui. Deuxièmement, elle est caractérisée par un déplacement plus rapide que la marche, induisant un déséquilibre dynamique qui nécessite « *l'action de forces importantes* » (Prévost et Reiss, 2020) pour être soutenue. Ainsi, l'action de marcher et de courir étant distinctes, il a déjà été démontré que l'activité musculaire des membres inférieurs était différente pour ces deux activités (Prévost et Reiss, 2020). On pourrait alors supposer qu'il en est de même pour les muscles du pied. C'est ce que tentent de démontrer de multiples auteurs aujourd'hui. Ainsi, Dubois (cité dans Blaise, 2021) explique que les muscles du pied entrent en jeu lors de différentes phases de la course. D'abord, ces muscles subiraient eux aussi une phase excentrique lors de la pose d'appui du pied en course. Pendant celle-ci, leur rôle serait de rigidifier et de maintenir la hauteur de l'arche médiale puis de stocker l'énergie pendant la phase de réception du pied au sol (Dubois cité dans Blaise, 2021). Riddick et al. (2019) ajoutent que la contraction excentrique des muscles intrinsèques du pied lors de la course pourrait « *faciliter l'amortissement de l'énergie pendant la décélération rapide* », c'est-à-dire lors de la pose du pied. Ces muscles subiraient ensuite une phase concentrique, servant à la propulsion du corps, pendant laquelle ils contribueraient à la restitution d'énergie. Leur contraction concentrique pourrait « *fournir une puissance positive pour les accélérations, en synergie avec la cheville, le genou et la hanche* » (Riddick et al., 2019). En d'autres termes, les auteurs stipulent que les muscles du pied participeraient pleinement à la locomotion rapide. Ainsi, Riddick et al. (2019) expliquent : « *il est évident que les muscles intrinsèques du pied ont la capacité de moduler activement la fonction énergétique du pied, en produisant et en dissipant l'énergie mécanique lorsque les tâches locomotrices exigent un travail positif et négatif* ». Aujourd'hui, en plus de leur rôle de soutien à l'arche médiale, les muscles plantaires sont donc considérés comme indispensables dans la course à pied.

L'activation des muscles du pied semble dépendante de la charge appliquée à ce dernier : ainsi, plus la charge appliquée est grande, plus l'activation des muscles du pied est importante. C'est ce que traduisent Kelly et al. (2019) dans leur étude. Selon eux, le système nerveux central module l'utilisation des structures passives et actives en fonction des besoins. Ceci est par ailleurs permis grâce à la disposition longitudinale des muscles intrinsèques du pied par rapport à l'arche médiale. Ainsi, les auteurs expliquent que pour des charges légères telles que la station debout ou la marche, « *les muscles intrinsèques du pied restent relativement inactifs, sauf en cas de perturbation importante du centre de masse* » (Kelly et al., 2019). En revanche, dès lors que les charges appliquées au pied augmentent, les muscles du pied sont activés dans le but de « *fournir une capacité énergétique supplémentaire au pied.* » (Kelly et al., 2019). Les auteurs estiment que pour que ces muscles entrent en jeu, « *des charges dépassant la masse corporelle doivent être appliquées au pied* ». Dès lors, « *la force produite par le*

muscle a augmenté l'énergie mécanique stockée dans le tendon (en série), s'ajoutant à celle stockée dans les composants élastiques parallèles (aponévrose plantaire) » (Kelly et al., 2019) permettent de faire face à ces charges. C'est par ce mécanisme que le pied peut restituer une si grande quantité d'énergie lors de la course à pied, qui nécessite une absorption et une restitution d'énergie bien plus conséquente que la marche. Mais attention, une sur-stimulation de ces muscles peut également s'avérer néfaste : selon Kelly et al. (2019) « des muscles du pied trop réactifs peuvent conduire à une activation inutile, ce qui pourrait potentiellement augmenter le coût métabolique de la locomotion. »

En définitive, le pied est doté d'un ensemble d'arches, de tendons et de muscles dont le rôle majeur est de favoriser la propulsion du corps lors de locomotion. Pour une locomotion lente, seules les structures passives sont nécessaires. Mais dès qu'une charge est appliquée au pied, les muscles intrinsèques entrent en jeu en favorisant le stockage et la restitution d'énergie. Ceux-ci semblent donc jouer un rôle important lors de la course à pied.

1.3 Atrophie des muscles plantaires et performance sportive

Malgré l'avancé des recherches, le rôle du pied dans la locomotion reste questionné. En effet, l'utilisation constante de chaussures module son anatomie, et donc son efficacité.

D'après Holowka et al. (2018) : « tous les êtres humains naissent avec une voûte plantaire basse ». Celle-ci ne se forme que vers l'âge de 10 – 12 ans (Holowka et al., 2018). C'est à ce moment-là que la locomotion devient efficace. Mais, ces dernières années, de nombreuses études ont démontré des modifications dans l'efficacité du pied lors de la locomotion, notamment chez les occidentaux. Hollander et al. (2017) stipulent que « l'utilisation de chaussures peut influencer la morphologie du pied et de la voûte plantaire ». Ainsi, les chaussures provoqueraient une modification anatomique des orteils et de la voûte plantaire ce qui aurait pour conséquence une éversion du pied, une diminution de la hauteur de la voûte plantaire et une réduction de la souplesse des pieds (Hollander et al., 2017 ; Holowka et al., 2018). Les chaussures dites « conventionnelles » sont caractérisées par Kelly et al. (2016) comme des chaussures possédant une « semelle viscoélastique épaisse », communément appelée amorti, et un soutien important. Depuis l'apparition de ces chaussures, le pourcentage de pieds plats ne fait qu'augmenter. Les pieds plats sont définis comme un positionnement anormal de la voûte plantaire, du fait d'un développement anormal ou d'un affaissement de celle-ci avec le temps (Holowka et al., 2018). Ces auteurs stipulent qu'à l'heure actuelle, environ « 20 à 25 % des adultes aux États-Unis et au Canada sont diagnostiqués comme ayant des pieds plats ». Or, les modifications anatomiques engendrées par le port de chaussures ne sont pas sans conséquences. Les chaussures sont aujourd'hui conçues dans le but de supporter la voûte plantaire et limiter la tension appliquée aux tissus mous. Mais elles sont en réalité néfastes pour le pied. En effet, Kelly et al. (2016) montrent dans leur étude que le port de chaussure entraîne une réduction de la compression de la voûte plantaire ce qui limite « la capacité du pied à

stocker et à restituer l'énergie par des mécanismes élastiques ». Les chaussures, aujourd'hui vendues pour leurs capacités d'amorti et de soutien dans un but de performance nuisent donc aux fonctions primaires du pied. Kelly et al. (2016) affirment qu'elles induisent « *une réduction de l'activation des muscles qui soutiennent la voûte plantaire, entraînant leur faiblesse et leur atrophie* ». Cela est appuyé par Holowka et al. (2018) qui stipulent que les muscles abducteur hallucis et abducteur digiti minimi deviennent plus petits que pour des personnes ayant été davantage pieds nus. Ces muscles étant associés à la hauteur de la voûte plantaire, celle-ci tend à diminuer et à perdre en rigidité, du fait de « *muscles intrinsèques du pied plus faibles* » (Holowka et al., 2018). Ces changements de caractéristiques plantaires sont également valables pour les chaussures à semelle carbone : leur mécanisme permettant une amélioration de l'économie de course et donc des performances (Healey et Hoogkamer, 2022), on serait tenté de penser que le pied y est plus efficace. Pour autant, comme pour tout autre chaussure, le travail de la semelle ne fait que remplacer le travail du pied. Ainsi, celui-ci reste inactif, et donc faible malgré des performances qui tendent à s'améliorer. Selon, Healey et Hoogkamer (2022) cette amélioration des performances est simplement due à une plaque carbone plus efficace que dans les autres chaussures.

Les athlètes ne font donc pas exception à la règle. Ainsi, ils peuvent aussi faire face à une réduction de l'efficacité de leur pied du fait d'une faiblesse de ses muscles intrinsèques. Or, en athlétisme, l'activité du pied est primordiale. L'athlétisme peut être considéré comme un sport multidisciplinaire se décomposant en cinq grandes disciplines : les courses, les sauts, les lancés, la marche athlétique et les épreuves combinées. C'est un sport à dominante énergétique, dans lequel les athlètes se confrontent à leurs adversaires mais aussi à leurs propres limites. En athlétisme, et notamment en demi-fond et fond, les facteurs de performance sont nombreux. Parmi eux, on retrouve les temps de contact au sol, fortement liés à l'économie de course et donc primordiaux pour la performance (Da Silva, 2015). Le temps de contact au sol correspond à la prise d'appui, c'est-à-dire au laps de temps entre le moment où le pied entre en contact avec le sol et le moment où il le quitte (Da Silva, 2015). Lors de la course, la phase de contact du pied avec le sol est considérée comme une des phases les plus coûteuse en terme métabolique. Da Silva (2015) stipule que c'est lors de cette phase que la contraction des muscles du membre inférieur est la plus importante. Lors de l'amortissement, ces muscles produisent une contraction excentrique via leur étirement. L'énergie emmagasinée pendant cette phase est stockée dans les muscles afin d'être restituée. Or, comme nous l'avons expliqué précédemment, une faiblesse musculaire au niveau des pieds limite la capacité d'absorption de ceux-ci et donc leur capacité à restituer un maximum d'énergie de façon efficace. Leur solidité musculaire semble donc importante. Ce processus est identique concernant les qualités pliométriques de l'athlète. La pliométrie est définie comme un cycle « *d'étirement-raccourcissement* » (Prevost et Reiss, 2020) : c'est un régime de contraction dans laquelle une

contraction concentrique est améliorée par une contraction excentrique préalable. Tout comme les temps de contact au sol, la pliométrie participe largement à la performance en athlétisme. En effet, lors de la course, c'est ce régime de contraction qui entre en jeu : « *le muscle est pré-activé* » grâce à une contraction excentrique précédent à la phase d'appui, puis il « *s'étire* » et « *reste en tension en gardant sa longueur* » pendant l'amortissement. Enfin, celui-ci « *se raccourcit lors de la propulsion* ». (Rudaz, 2019). Ce phénomène se répète à chaque appui, faisant des qualités pliométriques de l'athlètes un enjeu majeur dans la performance sportive. C'est en effet la « *capacité élastique d'un muscle et sa capacité à emmagasiner de l'énergie et à la restituer au système* » qui lui permettra de réaliser des performances (Rudaz, 2019). Selon Da Silva (2015), la diminution du temps entre le passage de la phase excentrique à la phase concentrique traduit la capacité du coureur à produire une contraction rapide et efficace. Dans ce cadre, le renforcement des muscles du pied est primordial. Selon Rudaz (2019), il permettrait de retarder la fatigue musculaire et d'améliorer la raideur des muscles. Cela favoriserait une meilleure restitution d'énergie et une diminution de la sollicitation du système métabolique (Rudaz, 2019).

Ainsi, après avoir abordé l'importance des muscles du pied dans la réalisation d'une performance en athlétisme, la question que nous pouvons poser est la suivante : comment un athlète peut-il être performant en demi-fond et/ou en fond si ses muscles du pied sont faibles et alors que le pied est son premier outil de performance puisqu'il est le seul organe qui le relie au sol ? Nous tenterons donc de répondre à cette question dans ce mémoire en décelant l'importance du rôle des pieds dans les temps de contact au sol et les qualités pliométriques d'un athlète.

Avant de répondre à la question que nous venons de poser, nous pouvons nous intéresser aux études ayant déjà été menées à ce sujet. Le renforcement des muscles du pied à déjà été évoqué par de nombreux scientifiques d'un point de vue médical. Par exemple, Mulligan (2013) met en avant qu'un entraînement des muscles du pied a un effet bénéfique sur la pronation, la hauteur de la voûte plantaire ainsi que l'équilibre dynamique. À l'heure actuelle, quelques études se sont portées sur le lien entre renforcement des muscles du pied et performance. Chez les non sportifs comme chez les sportifs, des protocoles ont mis en avant des améliorations chez les sujets évalués après un entraînement des muscles du pied. On remarque souvent une augmentation de la force du pied (Goldmann et al., 2013 ; Hashimoto et al., 2014 ; Sulowska et al., 2019). Goldmann et al. (2013) stipulent que l'entraînement proposé a favorisé une meilleure coordination motrice mais également une hypertrophie des muscles du pied ce qui a engendré une amélioration de leur force. D'autre part, des modifications biomécaniques ont été observées (Hashimoto et al., 2014 ; Sulowska et al., 2019) après seulement quatre à six semaines d'entraînement en fonction des études. Chez Hashimoto et al. (2014), les sujets non sportifs ont vu leur voûte plantaire se raccourcir et leur maintien s'améliorer au niveau du pied. Cette modification de la longueur et de la hauteur de la voûte plantaire est due à sa formation du fait du renforcement des muscles

qui l'entourent (Sulowska et al., 2019). Dans l'étude de Sulowska (2019), une réduction de la pronation ainsi qu'une amélioration de la posture du pied ont aussi été remarquées après six semaines d'entraînement. Hashimoto et al. (2014) considèrent que l'augmentation de la force du pied perçue dans les différentes études menées sur les muscles intrinsèques serait dû à une augmentation du « *volume de l'activité des fléchisseurs intrinsèques du pied* » qui s'améliorerait principalement dans le cas où des charges élevées seraient appliquées au pied. De plus, ces améliorations ont été accompagnées par des augmentations de performance. Goldmann (2013) et Hashimoto (2014) mettent en avant une amélioration des performances sur le saut horizontal notamment. Hashimoto (2014), Abe et al. (cités dans Sulowska et al., 2019) et Sulowska et al. (2019) ont quant à eux mis en évidence une amélioration des performances sur sprint court (50 mètres et 35 mètres). En revanche, aucun de ces auteurs n'a pu mettre en avant une hausse des performances sur le saut vertical. Pour expliquer cela, Goldmann (2013) et Sulowska (2019) considèrent que la modification de la position anatomique du pied engendrée par le renforcement musculaire serait plus propice au développement d'une force horizontale. Ils estiment que les muscles du pied ne nécessitent pas la même relation force-longueur dans les sauts horizontaux et dans les sauts verticaux. Or ici, le travail du pied aurait amené à une position du pied et de la cheville qui serait plus propice à la relation force-longueur adéquate au développement de la force horizontale (Goldmann, 2013).

Pour terminer, à notre connaissance, aucune étude n'a tenté de démontrer le lien entre la force des muscles du pied et les temps de contact au sol et/ou les qualités pliométriques des athlètes.

2. Problématique, objectifs et hypothèses

2.1 Problématique

Dans le domaine de l'entraînement en athlétisme, nous faisons face à un grand oublié : le pied. Aujourd'hui, les entraîneurs demandent à leurs athlètes de posséder un pied fort et de faibles temps de contact au sol afin de performer. Mais pourtant, peu de renforcement musculaire spécifique ne lui est dédié. De plus, nous avons vu précédemment que le port de chaussures ne favorisait pas l'efficacité du pied. Dans ce mémoire, nous évaluerons donc **l'intérêt d'un cycle de renforcement musculaire spécifique des muscles intrinsèques du pied pour l'amélioration des temps de contact au sol et des qualités pliométriques chez les coureurs de demi-fond et fond en athlétisme.**

2.2 Objectifs

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'intérêt d'un renforcement musculaire des muscles intrinsèques du pied dans un but d'amélioration des performances sportives en demi-fond et fond. Nous évaluerons l'efficacité d'un protocole de renforcement de six semaines sur l'amélioration des temps de contact au sol des athlètes ainsi que sur leurs qualités pliométriques.

2.3 Hypothèses

H0 : l'entraînement spécifique du pied n'induit pas d'amélioration de la force du pied et n'a pas d'influence sur les temps de contact au sol ni les qualités pliométriques des demi-fondeurs et fondeurs

H1 : l'entraînement spécifique du pied induit une amélioration de la force du pied sans amélioration des temps de contact au sol ni des qualités pliométriques des demi-fondeurs et fondeurs

H2 : l'entraînement spécifique du pied induit une amélioration de la force du pied avec amélioration des temps de contact au sol mais sans amélioration des qualités pliométriques des demi-fondeurs et fondeurs

H3 : l'entraînement spécifique du pied induit une amélioration de la force du pied avec une amélioration des qualités pliométriques mais sans amélioration des temps de contact au sol des demi-fondeurs et fondeurs

H4 : l'entraînement spécifique du pied induit une amélioration de la force du pied avec une amélioration des temps de contact au sol une et amélioration des qualités pliométriques des demi-fondeurs et fondeurs

3. Stage

3.1 Milieu professionnel

Pour cette année 2022-2023, j'effectue mon stage au Lille Métropole Athlétisme (LMA). Il s'agit du club d'athlétisme de Lille. Il comprend 1200 licenciés dont 28 athlètes de haut niveau. Il est toujours classé deuxième club de France par la Fédération Française d'Athlétisme (FFA). Le LMA est dirigé par Alain Ligné. Le club est divisé en trois sections. J'effectue mon stage dans la section du Lille Université Club (LUC). Dans cette structure, mon tuteur professionnel est Etienne Mowat, entraîneur du groupe demi-fond / fond. Il est également trésorier du LUC et participe au conseil d'administration du LMA. Les entraînements de cette section ont lieu sur le stade de la Faculté des Sciences du Sport et de l'Éducation Physique (FSSEP) ou au stade couvert Jean Bouin. Ils ont lieu le lundi, mardi, mercredi et jeudi soir principalement.

L'année passée, le club avait un objectif majeur : devenir champion de France des clubs en terminant premier lors des interclubs Elite. Or ils n'ont pas réussi : le LMA a terminé troisième. Cet objectif est donc encore d'actualité cette année, avec la volonté de développer le Haut Niveau et d'attirer au LMA les grands athlètes français afin de faire rayonner le club. Au niveau de la section LUC, l'objectif est de diversifier les services proposés aux athlètes en ajoutant des créneaux sprint et en proposant des stages supplémentaires. Sportivement parlant, le LUC aimerait fidéliser ses jeunes athlètes et les faire participer à davantage de compétitions (Equip'Athlé). En demi-fond, l'objectif est le même que l'année passée : emmener le plus d'athlètes possible aux championnats de France de cross.

Vis-à-vis de mon rôle dans la structure, différentes missions m'ont été données. Dans un premier temps, je suis chargée de l'entraînement de plusieurs sections. J'interviens auprès du groupe de demi-fond / fond les lundis soir. L'entraîneur me confie une partie de la séance qu'il a programmé à mettre en place. Sinon, il me charge de proposer aux athlètes une fin de séance. Le mercredi soir, je prends en charge la moitié du groupe pour une séance de renforcement musculaire. Cet hiver, je me suis occupée des novices et des athlètes confirmés qui n'ont pas prévu d'effectuer de compétitions hivernales. Cette séance a pour objectif de proposer des exercices permettant aux athlètes d'acquérir les capacités nécessaires pour pouvoir passer en séance de musculation avec charges pour la deuxième partie de l'année, ou pour l'année prochaine. À partir du mois d'avril, j'ai eu l'occasion de prendre l'autre moitié du groupe afin de commencer à les préparer pour leur saison estivale. Ensuite, les mardis et jeudis soir, je co-entraîne le groupe de sprint avec Olivier Libert. Nous créons ensemble la séance, puis nous nous répartissons les tâches. Sur une séance d'1h30, je prends en charge la séance sur une moitié, Olivier sur l'autre. Je suis chargée d'accompagner le groupe sur les compétitions. Je co-entraîne également la

section Athle Fit le mardi midi, toujours avec Olivier Libert. Nous proposons des exercices athlétiques, de course, de renforcement pour des personnes qui ont une pratique loisir. Enfin, j'entraîne les benjamins et les minimes du club sur le créneau du mercredi après-midi. Je les accompagne également sur quelques compétitions dans l'année.

Dans un second temps, le club souhaite que j'intervienne lors des journées organisées par l'Institut des Rencontre de la Forme (IRFO). Cela se présente sous la forme suivante : j'aide à réaliser des tests physiques auprès de la population avec l'aide d'autres entraîneurs. Enfin, des tâches administratives ainsi que des remplacements me sont parfois confiées.

3.2 Sujets

Dans le cadre de mon stage, je travaille avec une partie du groupe de demi-fond. Il est composé d'une quarantaine d'athlètes, hommes et femmes. Les plus jeunes sont des cadets (15 ans), et les plus anciens sont des masters (35 ans et plus). Dans le cadre de mon protocole de mémoire, 14 athlètes ont participé aux pré et post-tests. L'âge moyen du groupe est de 23 ans (± 6 ans), la taille moyenne de 171,5 cm (± 9) et la masse moyenne de 61 kg (± 9). J'ai ensuite divisé ce groupe en deux afin de créer un groupe contrôle ($n = 7$) et un groupe expérimental ($n = 7$). Cette répartition s'est faite de façon aléatoire. L'âge moyen du groupe contrôle est de 22 ans (± 7), la taille moyenne de 171 cm (± 11) et la masse moyenne de 58 kg (± 6). Pour le groupe expérimental, l'âge moyen est de 24 ans (± 5), la taille moyenne de 171 cm (± 7) et la masse moyenne de 64 kg (± 11).

Le groupe expérimental a été pris en totalité par moi-même lors de la séance du mercredi. Cela m'a permis d'organiser la séance comme je le souhaitais. Le but était de leur proposer une séance de renforcement musculaire tout en ajoutant mes exercices de renforcement du pied.

3.3 Matériel, techniques de mesure et protocole

3.3.1 Matériel et techniques de mesure

Dans le cadre de ce mémoire, un ensemble de matériel a été emprunté pour la réalisation des tests. La totalité du matériel a à la fois été utilisé pour les pré-tests mais aussi pour les post-tests.

Un pied à coulisse manuel de la marque Dexter a été utilisé. Il se présente sous forme de réglette à double bec. Il a servi pour la mesure de la chute naviculaire du pied, au niveau de l'arche médiale. Il s'agit d'un outil très utilisé dans la littérature pour sa précision. On le retrouve dans de nombreuses études pour le calcul de la chute naviculaire par exemple (Mulligan, 2013 ; Tourillon et al., 2019).

Un dynamomètre manuel m'a été prêté par la FSSEP. Il s'agit du modèle Sigma 106 de la marque Grip-D. Il a servi au test de dynamométrie plantaire. Il a donc permis d'obtenir la force des muscles

intrinsèques du pied, mesurée en kg. Selon Soysa et al. (2012), cet outil permet de mesurer la force des muscles du pied, notamment « *la force des fléchisseurs des orteils* ». Les auteurs indiquent qu'il s'agit d'un outil fiable, même si son utilisation doit respecter quelques critères. Le déroulement du test est détaillé ci-après.

Un Optojump Next a également été prêté par la FSSEP. La longueur nécessaire aux mesures est d'un mètre seulement. Il a permis de mesurer l'élasticité musculaire des athlètes via le test du Rebond Jump. Parmi les mesures obtenues, les temps de contact au sol (ms) ainsi que la hauteur de saut (cm) ont été retenus. L'Optojump est un outil de mesure qui a été validé scientifiquement. Bjelica et al. (2021) définissent l'Optojump comme « *un système de mesure optique* » dont les données sont fiables et précises. Il peut donc être utilisé dans le cadre d'un protocole de recherche.

3.3.2 Protocole

La mise en place du protocole a eu lieu en janvier et février 2023. Le protocole s'est étendu sur huit semaines au total. La première semaine ainsi que la dernière ont été dédiées aux tests. L'entraînement des muscles du pied a donc duré six semaines. Les athlètes ont été répartis en deux groupes, de façon aléatoire. D'un côté, le groupe contrôle (GC) : il comprend les athlètes qui ont effectué les tests mais qui n'ont pas participé au protocole d'entraînement des muscles du pied. D'un autre côté, le groupe expérimental (GE) : il comprend les athlètes qui ont participé aux tests ainsi qu'au protocole d'entraînement. Le groupe expérimental (GE) a été pris en charge le lundi et le mercredi des semaines deux à sept. Les exercices dédiés à du renforcement des muscles du pied ont été intégrés dans l'échauffement le lundi et au sein de la séance le mercredi. Au fur et à mesure du temps, les exercices sont devenus plus intégrés à la discipline. Les séances proposées sont à retrouver en annexe n° 2.

Les pré-tests et post-tests ont été standardisés afin d'être réalisés de façon identique. La séance a duré 1h30. Elle s'est déroulée comme s'ensuit :

En groupe, les athlètes ont commencé par un échauffement standardisé. Ils ont effectué 10 minutes de footing, à leur allure habituelle. Ils ont réalisé des étirements balistiques : 15 balancés de face par jambe, 15 balancés de côté par jambe. Puis, ils ont terminé avec quelques gammes sur une distance de 20 mètres. Les gammes ont été réalisées dans l'ordre suivant : marche sur plante de pied ; marche sur talon ; déroulé de pied ; sautilllements pieds joints ; jambes tendues en fréquence ; jambes tendues en amplitude ; ½ montées de genoux en fréquence ; montées de genoux ; talons-fesses ; ½ cycle de jambe. Le retour s'est fait de façon trottinée. Ils ont effectué deux passages sur chaque gamme avant de repartir pour la suivante.

Ensuite, les pré et post-tests se sont déroulés de la façon suivante, dans l'ordre énoncé :

La chute naviculaire ou navicular drop (ND) : il s'agit d'un test couramment utilisé dans la littérature. Selon Tourillon (2019), « le test de chute naviculaire assis-debout à deux jambes ou à une jambe est l'évaluation la plus populaire de la stabilité de la voûte longitudinale dans la littérature ». Ce test permet notamment de déceler les athlètes ayant une voûte plantaire particulièrement basse. Le test a été réalisé pieds nus, afin d'avoir libre accès aux repères anatomiques nécessaires à la réalisation de la mesure. J'ai effectué une première mesure en position assise, puis en position debout (Fig 3). Chaque athlète est passé trois fois sur ce test. En cas de différence entre les mesures, c'est la mesure médiane qui a été prise en compte. La distance mesurée est l'écart entre le bord inférieur de la tubérosité proéminente de l'os naviculaire et le bord inférieur de la voûte plantaire (Shrader et al., 2005 ; Tourillon et al., 2019). La différence entre la mesure assise, dite position neutre, et la mesure debout est appelée la chute naviculaire, ou navicular drop (ND) (Fig. 4) (Shrader et al., 2005).



Figure 3 : mesure du ND en position debout à l'aide d'un pied à coulisse (Mulligan, 2013)

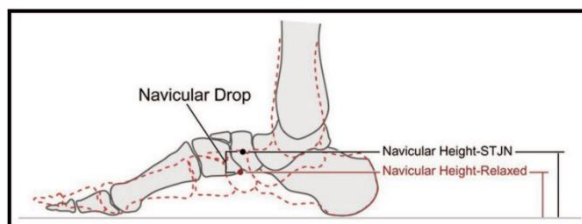


Figure 4 : illustration du pied en position neutre (STJN) et en position debout (Relaxed) pour la mesure du ND. (Shrader et al., 2005)

Le test de dynamométrie plantaire : les athlètes sont ensuite passés au dynamomètre (Fig. 5). Pour que le test soit correctement réalisé, trois conditions doivent être remplies : le dynamomètre doit être sous forme de poignet de préhension, afin que les orteils puissent s'agripper à celle-ci. Lors du test, il doit être fixe, c'est-à-dire tenu par une tierce personne, fixé ou positionné le long d'un mur. De même, il doit être « positionné sous l'articulation interphalangienne de l'hallux » (Soysa et al., 2012) afin que la mesure soit fiable. D'autres méthodes de mesure directe de la force du pied existent. Mais parmi eux, il en existe peu qui soient à la fois accessibles, peu coûteuses et qui permettent en même temps des mesures comparables entre elles. Cela a donc limité nos choix. Ainsi, j'ai décidé d'utiliser le dynamomètre manuel puisqu'il est considéré comme fiable. Mais ce choix s'appuie également sur les propos de Soysa et al. (2012), qui stipulent que la dynamométrie manuelle « active les muscles intrinsèques plus efficacement que d'autres types de dynamométrie des orteils ». Ainsi, les muscles

intrinsèques du pieds sont davantage sollicités : la force du pied relevée sur le dynamomètre devrait donc être plus proche de la réalité.

Pour ce test, chaque athlète a eu un essai non pris en compte afin d'appréhender l'outil et la position du pied. Puis, chacun d'eux est passé trois fois sur le test. La meilleure des trois performances a été prise en compte, ceci pour chaque pied.

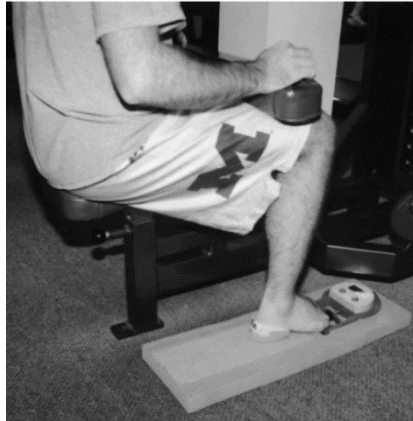


Figure 5 : mesure de la force de flexion des orteils assis avec un dynamomètre Sigma Grip-D (Unger et Wooden, 2000)

Le test Rebound Jump : les athlètes se sont positionnés entre les barres de l'Optojump pour le Rebound Jump. Ce test est inclus dans le Protocole Stiffness du manuel de typologie des tests de l'Optojump. Son protocole d'exécution est détaillé. Les athlètes sont positionnés comme s'ensuit : pieds largeur bassin, jambes tendues, dos droit et mains sur les hanches. Lorsque le test se déclenche, l'athlète réalise sept rebonds d'affilés, sur place, en maintenant les jambes tendues lors de la réception (les genoux doivent être bloqués). L'objectif étant d'analyser les caractéristiques élastiques des athlètes, ces derniers ont eu pour consigne d'aller le plus haut possible tout en ayant le temps de contact au sol le plus faible. La hauteur d'envol (en cm) et les temps de contact au sol (en ms) ont été récupérés. Chaque athlète a eu un essai non comptabilisé. Puis tous sont passés trois fois. La meilleure des trois performances pour chaque élément relevé lors du test a été retenue.

3.4 Analyse statistique

Les statistiques ont été établies à l'aide du logiciel « Microsoft Excel ». Les moyennes et écart-types ont été calculés pour le groupe contrôle comme pour le groupe expérimental.

Les deux groupes sont considérés comme indépendants car ils sont composés de sujets différents. Chacun d'entre eux possède des données pré-tests et post-tests qui ont été comparées entre elles. Pour déterminer le test statistique à utiliser, nous avons calculé la normalité des données avec le test de Shapiro-Wilk. Puis nous avons établi l'homogénéité des variances avec le test de Levene. Lorsque les deux conditions évoquées étaient remplies, nous avons utilisé un test paramétrique. Il s'agit du test Anova à deux dimensions. Nous avons alors comparé l'effet temps (mesure répétée) et l'effet groupe. Dans le cas où le test Anova révèle une différence entre les groupes, nous avons réalisé un test post-hoc afin de déterminer où se trouve la différence au sein des données. Pour cela, nous nous sommes servis du test Student avec la correction de Bonferroni. Dans l'autre cas, c'est-à-dire si au moins l'une des deux conditions de normalité ou d'homogénéité n'a pas été remplie, nous nous sommes tournés vers un test non paramétrique. Nous avons utilisé le test de Kruskal & Wallis pour l'effet groupe. En ce qui concerne l'effet temps, nous avons utilisé le test de Friedman pour échantillons appariés.

Enfin, nous avons déterminé la taille de l'effet grâce au d de Cohen. Il a été utilisé dans le but de comparer les deux groupes et d'établir la force de la relation entre les données. Les interprétations que nous avons utilisées sont : seuil à 0,2 « Faible » ; seuil à 0,5 « Moyen » ; seuil à 0,8 « Élevé » ; seuil à 1,2 « Très élevé » ; seuil à 2 « Immense ».

Pour ces tests statistiques, le seuil de significativité est estimé à 5% ($p < 0,05$).

4. Résultats

L'ensemble des résultats obtenus sont présentés sous forme de diagramme ci-après afin de comparer les moyennes et écart-types de chaque groupe. Le groupe contrôle est noté « **GC** » tandis que le groupe expérimental est noté « **GE** ». Pour chacun des diagrammes, les résultats des **pré-tests** et des **post-tests** sont indiqués. Les résultats statistiques significatifs ($p < 0,05$) ont été indiqués par « # » lorsqu'ils concernent une différence inter-groupe (facteur groupe). Ceux-ci ont été notés « * » lorsqu'ils concernent une différence intra-groupe (facteur temps).

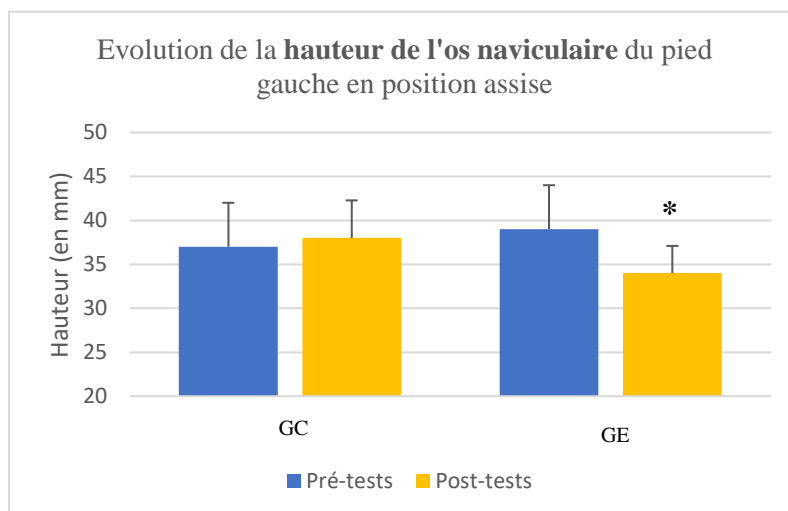


Figure 6 : résultats obtenus sur la mesure de la hauteur de l'os naviculaire du pied gauche en position assise pour les deux groupes lors des pré-tests et des post-tests

Pour le groupe contrôle, la hauteur de l'os naviculaire du pied gauche en position assise est estimée à 37 ± 5 mm lors des pré-tests. Celle-ci est de 38 ± 4 mm lors des post-tests. Pour le groupe expérimental, elle est estimée à 39 ± 5 mm lors des pré-tests et 34 ± 3 mm lors des post-tests.

D'un point de vue statistique, aucune différence significative n'est à noter concernant le facteur groupe. En revanche, une différence significative concernant le facteur temps est révélée par le test ANOVA. Malheureusement, ce test ne précise pas le lieu de la différence c'est-à-dire si celle-ci concerne le groupe contrôle et/ou le groupe expérimental. Pour la connaître, nous devons utiliser le test Student avec la correction de Bonferroni. Nous appliquons donc la règle selon laquelle la valeur de p est divisée par le nombre d'échantillons comparés. Pour cette correction, nous appliquons un seuil de significativité à 2,5% ($p < 0,025$) car nous comparons deux échantillons appariés (facteur temps). Ainsi, lors de la réalisation du test, nous obtenons les résultats suivants : $p = 0,89$ pour le groupe contrôle et $p = 0,018$ pour le groupe expérimental. Nous pouvons donc dire qu'il n'existe pas de différence significative pour le groupe contrôle concernant le facteur temps ($0,89 > 0,025$). En revanche, il en existe une pour le groupe expérimental ($0,018 < 0,025$) qui a vu sa hauteur d'os naviculaire diminuer au niveau du pied gauche entre les pré-tests et les post-tests. Pour cette mesure, la taille de l'effet est estimée 1,21 (seuil très élevé).

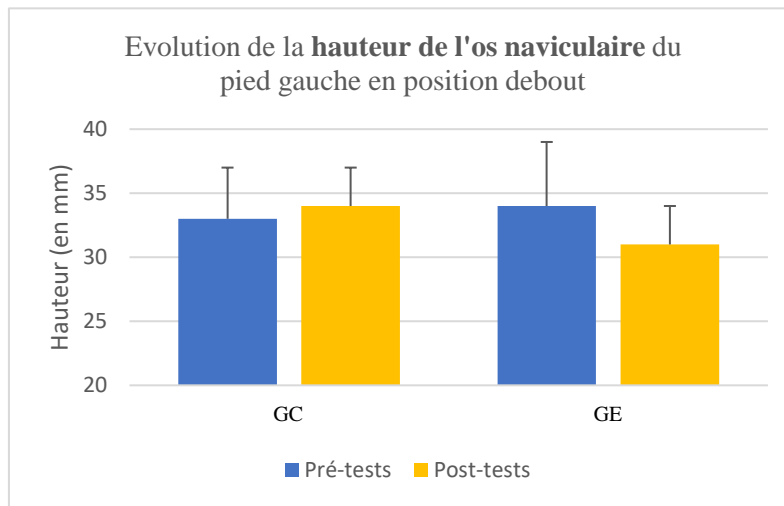


Figure 7 : résultats obtenus lors de la mesure de la hauteur de l'os naviculaire du pied gauche en position debout pour les deux groupes lors des pré-tests et des post-tests

Le groupe contrôle possède une hauteur d'os naviculaire de 33 ± 4 mm lors des pré-tests pour 34 ± 3 mm lors des post-tests. Pour le groupe expérimental, celle-ci est évaluée à 34 ± 5 mm pour les pré-tests contre 31 ± 2 mm pour les post-tests.

Aucune différence significative n'est observée concernant cette mesure, que ce soit pour le facteur groupe ou le facteur temps.

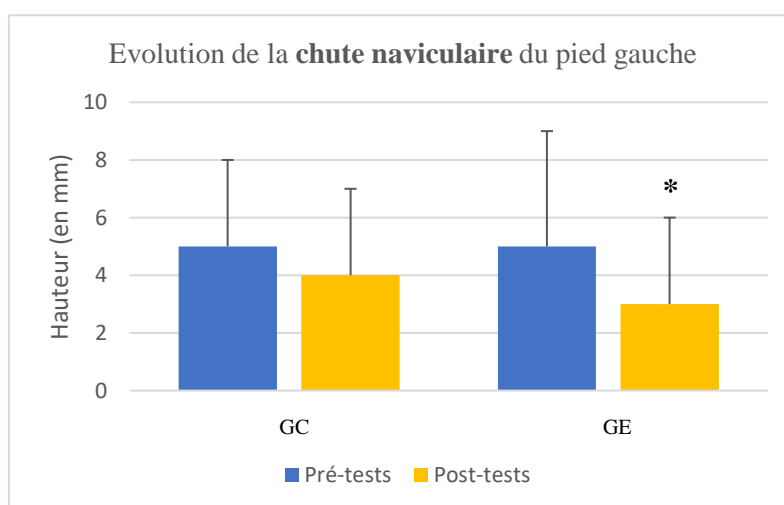


Figure 8 : résultats obtenus lors de la mesure de la chute naviculaire du pied gauche pour les deux groupes lors des pré-tests et des post-tests

Concernant le groupe contrôle, la chute naviculaire du pied gauche est calculée à 5 ± 3 mm lors des premiers tests contre 4 ± 3 mm pour les seconds. Pour le groupe expérimental, elle est estimée à 5 ± 4 mm pour les pré-tests contre 3 ± 3 mm pour les post-tests.

Les tests statistiques ne révèlent aucune différence significative à propos du facteur groupe. Concernant le facteur temps, ceux-ci ont mis en avant une différence significative pour le groupe

expérimental : la chute naviculaire a été diminuée de 5 ± 4 à 3 ± 3 mm. Pour ce test, la taille de l'effet est calculée à 0,6 (seuil moyen).

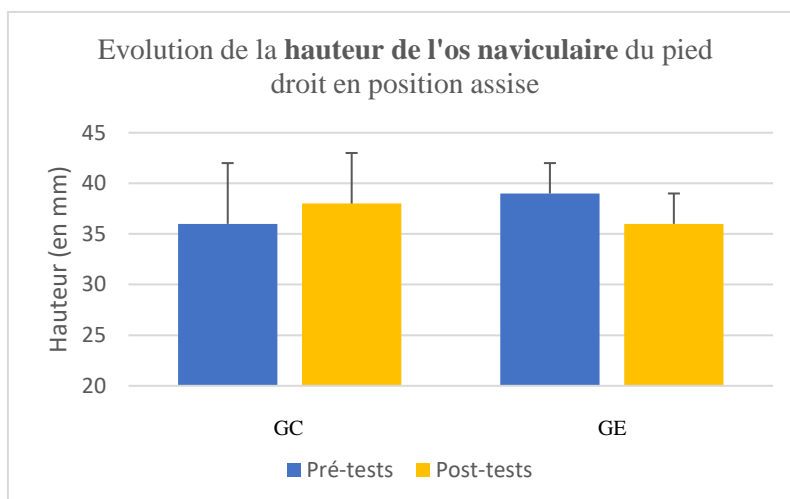


Figure 9 : résultats obtenus pour la mesure de la hauteur de l'os naviculaire du pied droit en position assise pour les deux groupes lors des pré-tests et des post-tests

En position assise, la hauteur de l'os naviculaire du pied droit du groupe contrôle a été mesurée à 36 ± 6 mm pour les pré-tests et 38 ± 5 mm pour les post-tests. Pour le groupe expérimental, elle a été estimée à 39 ± 3 mm puis 36 ± 3 mm.

D'un point de vue statistique, il n'y a pas de différence significative que ce soit pour le facteur groupe ou le facteur temps.

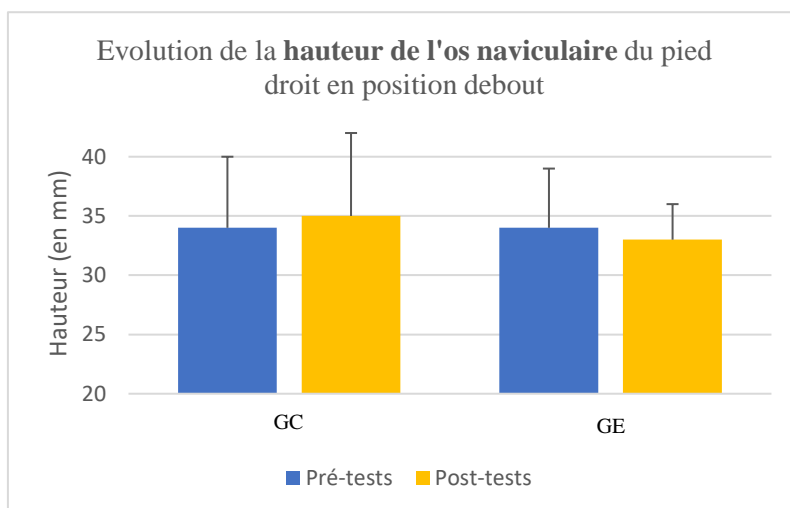


Figure 10 : résultats obtenus pour la mesure de la hauteur de l'os naviculaire du pied droit en position debout pour les deux groupes lors des pré-tests et des post-tests

En position debout, la hauteur de l'os naviculaire du pied droit est mesurée à 34 ± 6 mm lors des pré-tests puis 35 ± 7 mm lors des post-tests pour le groupe contrôle. Concernant le groupe expérimental, celle-ci est estimée à 34 ± 5 mm puis 33 ± 3 mm.

Aucune différence significative n'est à noter concernant ce test, que ce soit pour le facteur groupe ou pour le facteur temps.

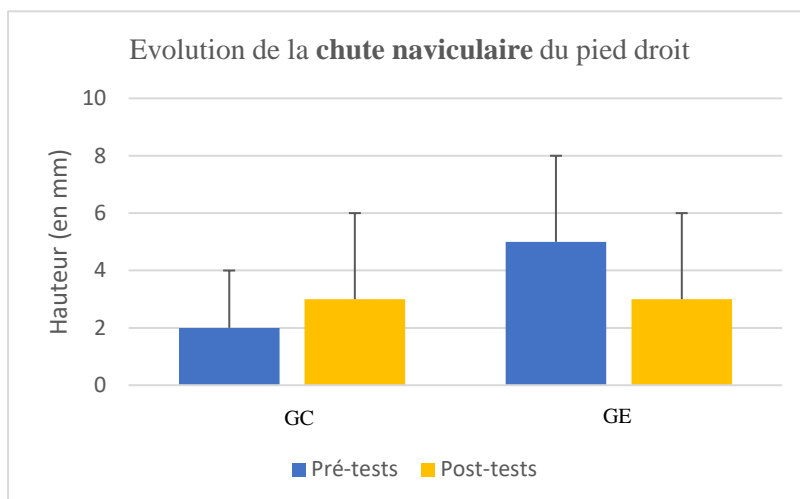


Figure 11 : résultats obtenus pour la mesure de la chute naviculaire du pied droit pour les deux groupes lors des pré-tests et des post-tests.

La chute naviculaire du pied droit est calculée à 2 ± 2 mm puis 3 ± 3 mm pour le groupe contrôle. Celle-ci est estimée à 5 ± 3 mm puis 3 ± 3 mm pour le groupe expérimental.

Concernant ce test, aucune différence significative n'a été mise en avant autant pour le facteur groupe que pour le facteur temps.

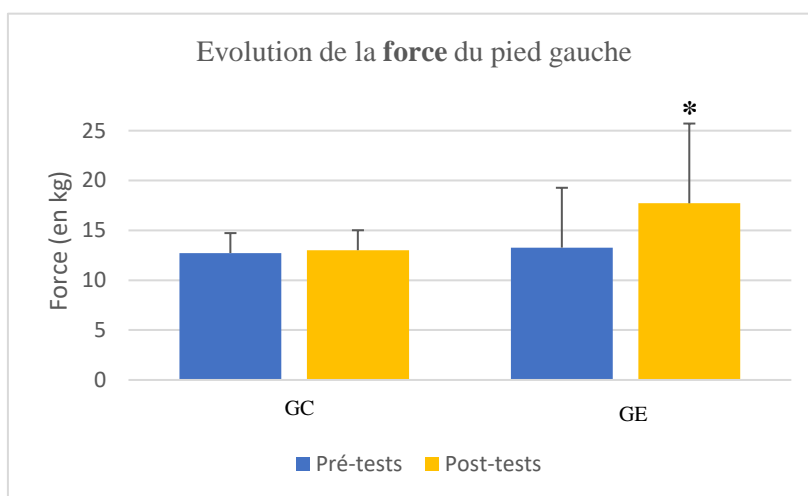


Figure 12 : résultats obtenus sur le test de dynamométrie pour la force du pied gauche pour les deux groupes lors des pré-tests et des post-tests

À propos de la force du pied gauche, celle-ci est mesurée à 13 ± 2 kg lors des pré-tests puis 13 ± 2 kg lors des post-tests pour le groupe contrôle. Pour le groupe expérimental, elle est évaluée à 13 ± 6 kg puis 18 ± 8 kg.

D'un point de vue statistique, aucune différence significative n'a été relevée concernant le facteur groupe. Concernant le facteur temps, aucune différence n'est relevée pour le groupe contrôle. En

revanche, une différence significative est à noter pour le groupe expérimental : leur performance moyenne a augmenté de 5kg lors des post tests par rapport aux pré-tests. Cette différence peut être dite « élevée », grâce à la taille de l'effet calculée à 0,7 (seuil élevé).

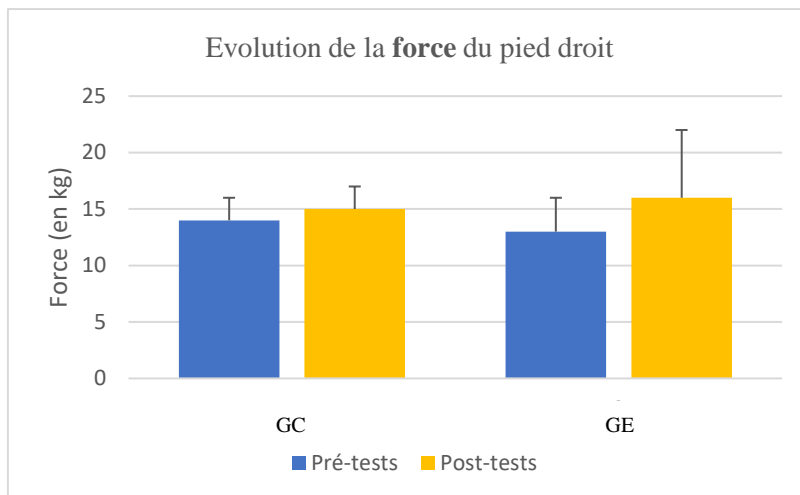


Figure 13 : résultats obtenus sur le test de dynamométrie pour la force du pied droit pour les deux groupes lors des pré-tests et des post-tests

En ce qui concerne la force du pied droit, celle-ci est mesurée à 14 ± 2 kg lors des pré-tests puis 15 ± 2 kg lors des post-tests pour le groupe contrôle. Elle est évaluée à 13 ± 3 kg lors des premiers tests puis 16 ± 6 kg lors des seconds pour le groupe expérimental.

Lors des tests statistiques, aucune différence significative n'a été mise en avant que ce soit pour le facteur groupe ou pour le facteur temps.

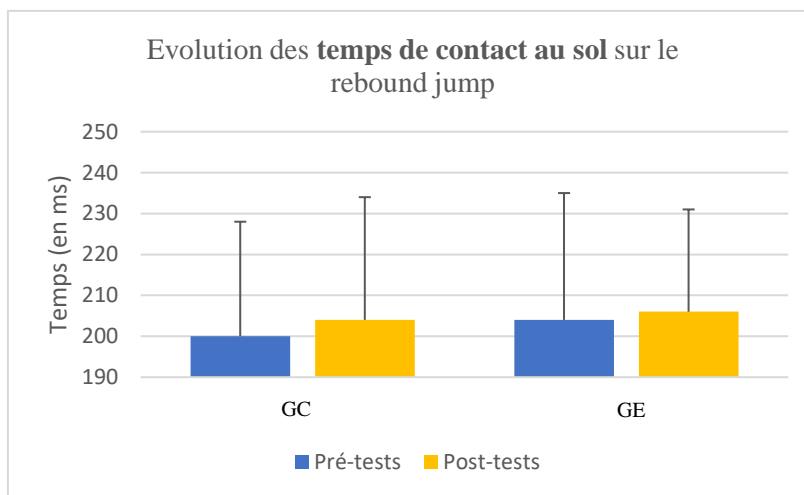


Figure 14 : résultats obtenus sur le Rebond jump pour les temps de contact au sol pour les deux groupes lors des pré-tests et des post-tests.

Les temps de contact au sol moyens du groupe contrôle sont de 200 ± 28 ms lors des premiers tests puis de 204 ± 30 ms lors des seconds. Ils sont de 204 ± 31 ms puis 206 ± 25 ms pour le groupe expérimental.

Sur ce test, aucune différence significative n'a été révélée que ce soit pour le facteur groupe ou le facteur temps.

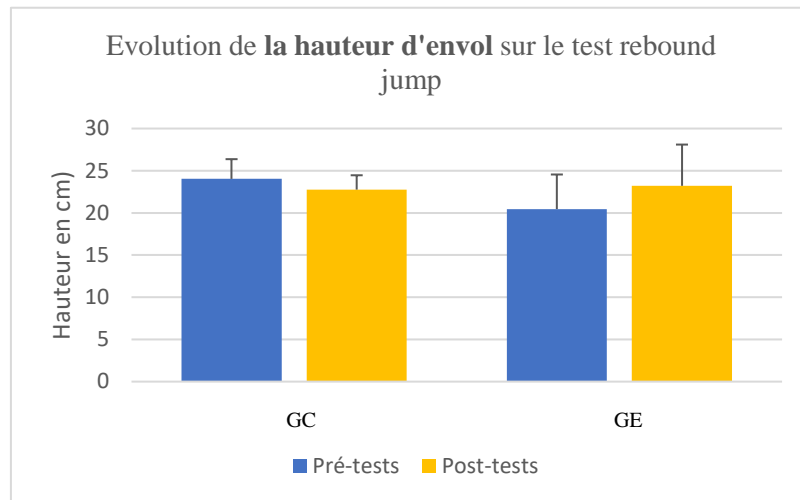


Figure 15 : résultats obtenus sur le Rebound jump pour la hauteur d'envol pour les deux groupes lors des pré-tests et des post-tests.

Concernant la hauteur d'envol, celle-ci est mesurée à $24,03 \pm 2,34$ cm lors des pré-tests puis $22,76 \pm 1,70$ cm lors des post-tests pour le groupe contrôle. Elle est estimée à $20,45 \pm 4,10$ cm puis $23,12 \pm 4,89$ cm pour le groupe expérimental.

D'un point de vue statistique, aucune différence significative n'a été mise en avant pour ce test, que ce soit pour le facteur groupe comme pour le facteur temps.

5. Discussion

Si l'on compare l'ensemble de nos résultats entre eux, plusieurs remarques peuvent être faites concernant l'évolution des deux groupes.

Dans un premier temps, pour le facteur groupe, aucune différence significative n'est à noter. Les résultats semblent homogènes entre les groupes sur l'ensemble des tests effectués.

Concernant le facteur temps, on observe d'abord une absence de résultats pour le groupe contrôle. Les sujets n'ont pas progressé d'un test à l'autre, ce qui semble normal puisqu'ils n'ont pas suivi d'entraînement du pied. Leurs résultats sont donc restés très stables dans le temps. Le groupe expérimental, quant à lui, a progressé sur certains tests. La hauteur de l'os naviculaire en position assise a diminué de 5 mm entre les tests ($p = 0,018$). La taille de l'effet est mesurée à 1,21 sur ce test, ce qui signifie que la différence est plutôt importante. La chute naviculaire a quant à elle diminué d'en moyenne 2 mm chez les sujets. Certains ont vu leur chute naviculaire diminuer drastiquement : de façon générale, on observe une diminution d'environ 53%. Pourtant, la taille de l'effet est ici mesurée à 0,6 : la différence entre les tests est donc moyenne. Enfin, la force du pied gauche des sujets est passée de 13kg à 18kg. On observe une progression moyenne de 36,8% sur l'ensemble du groupe. La taille de l'effet est calculée à 0,7 sur ce test, ce qui correspond à une différence élevée entre les mesures. Les six semaines d'entraînement ont donc eu un effet sur ces trois tests. En revanche, on note une absence de résultats pour la hauteur de l'os naviculaire du pied droit en position assise et debout, la chute naviculaire du pied droit, la force du pied droit, les temps de contact au sol et enfin la hauteur d'envol.

L'ensemble de ces résultats ne nous permettent pas de valider les hypothèses H2, H3 ou H4 puisqu'aucun résultat n'a été mis en avant concernant les temps de contact au sol et les qualités pliométriques des athlètes. Nous ne validerons pas non plus l'hypothèse H0 selon laquelle l'entraînement spécifique du pied n'induit pas d'amélioration de la force du pied et n'a pas d'influence sur les temps de contact au sol ni les qualités pliométriques puisque la force du pied gauche a été améliorée. Même si aucun résultat n'a été révélé pour le pied droit, l'amélioration de force du pied gauche signifie que l'entraînement a tout de même eu un impact positif sur les athlètes. En revanche, aucun transfert ne s'est fait vers les tests plus spécifiques à la discipline. Nous pouvons donc espérer qu'en continuant le protocole, d'autres résultats soient mis en avant. Ainsi, nous validons l'hypothèse H1, selon laquelle l'entraînement spécifique du pied induit une amélioration de la force du pied sans amélioration des temps de contact au sol ni des qualités pliométriques des demi-fondeurs et fondeurs en athlétisme.

Si l'on s'intéresse aux recherches qui ont été menées dans la littérature, on remarque que de nombreuses découvertes quant au renforcement des muscles intrinsèques du pied ont été faites. Dans un premier temps, on observe des similarités par rapport à mes propres résultats. Un bon nombre d'auteurs ont mis en avant l'amélioration de la posture du pied après un renforcement spécifique. Dans ce mémoire, on observe une diminution de la chute naviculaire du pied gauche, signifiant l'amélioration de la rigidité de la voûte plantaire. On retrouve des résultats très similaires chez Mulligan (2013) qui met en avant une diminution significative de la chute naviculaire de ses sujets. Après quatre semaines d'entraînement celle-ci est passée d'une moyenne de 12,7 mm à 10,9mm, puis 10,5mm après huit semaines d'entraînement. Par ailleurs, il stipule que ce travail a eu un impact plus important chez les individus possédant une chute naviculaire initiale très élevée, c'est-à-dire entre 10 et 15mm. La chute naviculaire étant selon lui un « *prédicteur de pronation* » (Mulligan, 2013), le renforcement du pied devrait être proposé en premier lieu à des individus sujets à cette déformation afin de lutter contre ses effets néfastes. Ses propos sont complétés par Sulowska et al. (2019) qui expliquent que la mise en place d'exercices de pied va améliorer sa posture en réduisant la pronation du pied et en lui rendant toute sa mobilité. Ainsi, l'amélioration de cette pronation est due à une stimulation des muscles intrinsèques du pied qui vont être renforcés par le travail effectué. Chez Goldmann et al. (2013), l'augmentation de la rigidité des muscles du pied s'est traduite par une formation plus archée de la voûte plantaire et de ce fait, par une réduction de sa longueur. C'est ce que l'on retrouve dans mes résultats avec une diminution de la chute naviculaire qui traduit une augmentation de la hauteur de l'arc plantaire. On peut donc supposer que l'augmentation de la hauteur de l'arche a provoqué une diminution de longueur de la voûte plantaire, même si celle-ci n'a pas été mesurée. Ainsi, les muscles intrinsèques du pied sont dits plus raides, mais aussi plus forts. Dans mon protocole comme dans la plupart des études publiées, on observe une amélioration de la force du pied. Selon Fukuda et Usaba & Ihara (cités dans Hashimoto et al. (2014)), cette amélioration peut survenir dès trois à quatre semaines d'entraînement. Ainsi, on retrouve par exemple une amélioration significative de la force des deux pieds chez Goldmann et al. (2013) ainsi que chez Hashimoto et al. (2014) qui eux ont proposé respectivement sept et huit semaines d'entraînement. Goldmann et al. (2013) expliquent ces améliorations par le fait que le travail de pied induit une hypertrophie des muscles intrinsèques ce qui améliore leur capacité à développer de la force. Mais, ils expliquent que ce travail génère également un meilleur recrutement des unités motrices : le nombre d'unités motrices recrutées à chaque contraction musculaire est augmenté, ce qui favorise la production de force.

D'un autre côté, les résultats que l'on retrouve dans la littérature sont plus poussés que les nôtres, notamment concernant les tests liés plus spécifiquement à la discipline pratiquée. Même si aucune étude n'a travaillé sur l'amélioration des temps de contact au sol et des qualités pliométriques, certaines

comparaisons avec la littérature sont possibles. En effet, lors de mon protocole, aucune amélioration n'a été mise en avant concernant les temps de contact au sol et les qualités pliométriques. Pour autant, Sulowska et al. (2019) stipulent que l'amélioration de la force du pied peut se traduire dans les performances sportives suite à un meilleur transfert de force et d'énergie. Ainsi, les muscles étant plus rigides, ils absorbent, transmettent et dissipent davantage l'énergie, permettant alors un meilleur renvoi et donc une amélioration lors des tests effectués. Ce phénomène n'a pas eu lieu dans le cadre de mes tests. Mais on le retrouve dans la littérature. Les principaux constats sont les suivants : le travail de renforcement du pied a provoqué une amélioration du transfert de force et de ce fait une amélioration des performances, notamment en saut horizontal et en course. Ainsi, Goldmann et al. (2013) et Hashimoto et al. (2014) ont mis en avant une amélioration sur les sauts horizontaux. Hashimoto et al. (2014) et Sulowska et al. (2019) quant à eux ont démontré une amélioration des temps en sprint court (50m et 35m). En revanche, peu d'études ont réussi à concrétiser le lien entre renforcement des muscles intrinsèques du pied et performance en saut vertical. Certains auteurs comme Goldmann (2013) et Sulowska (2019) expliquent que la relation force-longueur des muscles intrinsèques n'est pas propice au développement de force verticale et donc à l'amélioration des performances lors de ces exercices. Or, le Rebond Jump que les athlètes ont effectué lors de notre protocole pourrait être associé à un saut vertical. En effet, les rebonds se font sur place avec pour objectif principal de s'élever le plus haut possible uniquement avec le travail de pied et de cheville. Ainsi, l'exercice se réalise effectivement dans un plan vertical. Cela pourrait donc également expliquer le manque de résultats lors de ce test.

Enfin, dans notre étude, seul le pied gauche des athlètes a subi une amélioration significative sur les différents tests effectués. Or dans la littérature, les auteurs observent des progressions sur les deux pieds (Mulligan et al., 2013, Goldmann et al., 2013, Hashimoto et al., 2014, Sulowska et al., 2019). Plusieurs explications peuvent être mises en avant pour expliquer cette disparité. D'abord, notre protocole a été établi sur six semaines. Les athlètes ont suivi un entraînement du pied une fois par semaine seulement. Or, dans l'ensemble des études que l'on retrouve dans la littérature, les protocoles sont relativement plus conséquents. Chez Goldmann (2013), les athlètes s'entraînaient quatre fois par semaine pendant sept semaines. Chez Mulligan (2013) comme chez Sulowska (2019), des exercices étaient pratiqués tous les jours pendant respectivement huit et six semaines. La fréquence d'entraînement n'a donc peut-être pas suffi à nos athlètes pour s'améliorer au niveau de leur pied droit. Mais un autre élément peut expliquer cette différence entre le pied gauche et le pied droit. Les sujets de mon protocole étant des athlètes avec plusieurs années de pratique derrière eux, ils possèdent un capital musculaire déjà important mais aussi certaines habitudes. Une des principales différences peut s'expliquer par la notion de latéralité. La latéralité correspond au fait d'utiliser plus facilement une moitié du corps plutôt que l'autre. Ainsi, lors des entraînements, les athlètes favorisent l'utilisation d'un pied ou d'une jambe par rapport à l'autre en fonction de leurs préférences. Souvent, les entraîneurs parlent de « *pied fort* ». Ce

Le pied est davantage sollicité que l'autre, puisqu'il est celui qui va être préféré pour la foulée de poussée au départ, mais aussi pour l'impulsion en longueur par exemple. Or si l'on regarde du côté de nos sujets, cinq athlètes sur sept déclarent que leur pied fort est le pied droit. Ce pied étant davantage sollicité à l'entraînement, on peut supposer que ses muscles font régulièrement face à un panel de sollicitations plus large. Ceux-ci mettront donc davantage de temps à se développer et nécessiteront un travail plus accru. Ici, les sollicitations proposées dans nos séances d'entraînement n'ont donc peut-être pas été assez fréquentes ni assez importantes pour favoriser l'amélioration du pied droit.

Pour compléter notre analyse, il est nécessaire de mettre en avant certains biais qui ont pu altérer la mise en place des tests et de proposer des améliorations concernant le protocole. Plusieurs pistes de progression sont envisageables.

Tout d'abord, l'évaluation de la chute naviculaire avec la mesure de la hauteur de l'os naviculaire en position assise et debout est un test qui se veut normalement très précis. Nous pouvons donc noter ici la possibilité qu'il y ait eu des erreurs de mesure dû à mon manque d'expérience. En effet, ce test nécessite de s'exercer longuement. Même si nous avons tenté de réduire les erreurs, il est possible que certaines mesures soient sous-estimées ou surestimées. Concernant le test de dynamométrie plantaire, plusieurs remarques peuvent être faites. D'abord, un temps d'adaptation au test est nécessaire : la position du pied étant précise, il faut laisser le temps aux sportifs de comprendre la mise en place du test. Une phase de familiarisation a donc été proposée. Mais malgré cela, les athlètes se sont peut-être sentis plus à l'aise lors des post-tests, c'est-à-dire après avoir répété plusieurs mesures. Sur le test de force toujours, de nombreux auteurs comme Soysa et al. (2012) et Tourillon et al. (2019) stipulent qu'on ne peut être sûr qu'il ne mesure que la force des muscles intrinsèques du pied. Il est possible que d'autres muscles entrent en jeu, et notamment les muscles extrinsèques du pied, anatomiquement proches des muscles intrinsèques. D'autres muscles comme les mollets dont l'activité musculaire est très liée à la cheville et au pied peuvent aussi intervenir. Ainsi, la mesure de la force du pied peut avoir été influencée par la force de ces muscles. Enfin, concernant le Rebond Jump, au vu de ce que nous avons évoqué plus tôt, il aurait été préférable d'évaluer les qualités pliométriques ainsi que les temps de contact au sol sur un test horizontal. Ainsi, si nous avions eu un Optojump de plusieurs mètres à disposition, nous aurions simplement fait courir les athlètes au sein de l'Optojump afin de recueillir leurs temps de contact au sol en course ainsi que leurs temps d'envol entre deux foulées. Par ailleurs, cela aurait permis des mesures plus proches de la réalité de leur discipline.

Par conséquent, avec plus de pratique et un protocole perfectionné, nous pourrions espérer une amélioration des résultats sur les différents tests, et notamment les tests plus spécifiques au demi-fond.

Ainsi, l'ensemble de cette analyse nous permet de proposer quelques perspectives vis-à-vis de notre protocole.

En premier lieu, nous pouvons dire que la réalisation d'un renforcement spécifique des muscles du pied n'est pas sans intérêt. Son utilité est aujourd'hui avérée dans le domaine de la performance. C'est la raison principale qui nous permet ici de proposer quelques perspectives concernant le renforcement des muscles intrinsèques du pied. Tout d'abord, le renforcement du pied pourrait être introduit dans l'entraînement des coureurs. Cela prend peu de temps et peut facilement être intégré, que ce soit lors de l'échauffement ou lors du retour au calme en fin de séance. Les athlètes pourraient prendre l'habitude de travailler leurs pieds de façon spécifique une à deux fois par semaine d'abord pour les réhabituer à les travailler puis pour les renforcer. Cela pourrait se mettre en place très facilement grâce à des exercices simples d'étirement, de renforcement avec élastique et d'automassages par exemple. Mais au-delà de l'objectif d'amélioration des performances, il semble également important d'intégrer ce type de renforcement dans un but de prévention. Aujourd'hui, les muscles du corps ne sont plus considérés comme une addition de muscles isolés : ils sont vus comme un ensemble travaillant en chaîne et s'influençant les uns les autres. Certaines études, comme celle de Sulowska et al. (2019), se basent sur la notion « *Anatomy Trains* » qui stipule l'existence « *de connexions fasciales directes entre les structures musculaires adjacentes au sein du système fascial* » (Sulowska et al., 2019) qui facilitent les interactions entre les muscles. Ainsi, leur étude tend à montrer que le renforcement du pied joue un rôle sur l'ensemble de la ligne dorsale superficielle : il améliorerait la mobilité de la cheville et du genou mais également la flexibilité et le relâchement des muscles de la chaîne postérieure, et notamment des ischios-jambier. En plus de cela, nous avons vu que le renforcement du pied permet de lutter contre la pronation, qui, comme nous l'avons déjà évoqué, peut être source de blessure du fait de la rotation interne du tibia et de la rotation externe du bassin qu'elle provoque. Ainsi, nous pouvons proposer à l'entraîneur la réalisation d'un travail spécifique de pied dans un triple objectif : l'amélioration des performances de course, le gain de relâchement et de mobilité des membres inférieurs et la prévention des blessures.

6. Conclusion

Le renforcement des muscles intrinsèques du pied devient au fil des années un réel axe de travail pour l'amélioration des performances sportives. Les études conduites sur la pronation excessive de certains sujets ont mené les sportifs à s'intéresser à cette problématique. Aujourd'hui, avec l'avènement des chaussures conventionnelles, cette thématique est au centre de toutes les attentions. En effet, le rendu de ces chaussures n'est pas toujours celui escompté puisqu'elles favorisent l'atrophie des muscles intrinsèques du pied.

Ainsi, de nombreux auteurs se sont attelés à proposer des protocoles de renforcement dont le but est de lutter contre le phénomène des pieds plats, largement constaté dans les pays développés. Mais ces protocoles sont de plus en plus orientés vers l'amélioration des performances. Ils sont aujourd'hui plus spécifiques aux disciplines pratiquées, notamment à l'athlétisme. Leur efficacité n'est plus à démontrer puisqu'ils permettent une réelle amélioration des performances notamment en course et en saut. De même, les recherches s'élargissent déjà et certains auteurs étudient les améliorations en chaîne que peut provoquer le renforcement des muscles intrinsèques du pied. Des résultats ont déjà été mis en avant concernant l'amélioration de mobilité et de flexibilité du membre inférieur ainsi que la diminution du risque de blessures.

En revanche, un large panel de protocoles s'est développé au fil des ans. Du renforcement isométrique en passant par le protocole SFE (Short Foot Exercise) ou même l'isocinétisme, il est aujourd'hui facile de s'y perdre. De même, toutes les méthodes ne sont pas facilement accessibles ou ne peuvent pas être directement mises en place sur le terrain. De ce fait, nous pensons qu'un futur travail devrait être mené par les chercheurs afin de proposer un protocole de renforcement strict et clair qui soit efficace mais surtout accessibles à tous les entraîneurs et tous les athlètes sur le terrain.

7. Références bibliographiques

- Bjelica, B, Borislav, C, Ljubica, M, Mila, Z et Danijel, B, (2021). Use of Modern methods for Evaluation of Motor Performance. *International Journal of Physical Education, Fitness and Sport* 10, **1**, 10 – 15. [View of Use of Modern methods for Evaluation of Motor Performance \(ijpefs.org\)](https://www.ijpefs.org/)
- Blaise, T, (2021). *Intérêt du renforcement des muscles intrinsèques du pied dans la rééducation des patients présentant une instabilité chronique de cheville*. Mémoire d'Initiation à la recherche, IFPEK, Rennes. [doc_num.php \(centredoc.org\)](https://centredoc.org/doc_num.php)
- Captier, G, Chamoun, M et Bonnel, F, (2003). Organisation anatomique et biomécanique de la sole plantaire. *Médecine et chirurgie du pied*, **19**, 9 – 12. [Organisation-anatomique-et-biomecanique-de-la-sole-plantaire.pdf \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/312211110-Organisation-anatomique-et-biomecanique-de-la-sole-plantaire-pdf)
- Da Silva, P, (2015). *Effet d'un entraînement pliométrique sur les facteurs de raideur et de réactivité sur la course à pied*. Mémoire de fin d'étude, Faculté des sciences de Fribourg, Fribourg. https://folia.unifr.ch/documents/304994/files/Masterarbeit_DaSilva_Philippe.pdf
- Dedieu, P, (2020). Anatomie et physiologie de la marche humaine. *EMC-Podologie*, **2**, 1 – 14. [Anatomie et physiologie de la marche humaine \(univ-reims.fr\)](https://www.univ-reims.fr/ressources/medecine-et-sport/physiologie-de-la-marche-humaine)
- Goldmann, J. P, Sanno, M, Willwacher, S, et Heinrich, K, (2013). The potential of toe flexor muscles to enhance performance. *Journal of Sports Sciences*, **4**, 424 – 433. [\(PDF\) The Potential of toe flexor muscles to enhance performance \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/260211110-The-Potential-of-toe-flexor-muscles-to-enhance-performance)
- Hashimoto, T et Sakuraba, K, (2014). Strength training for the intrinsic flexor muscles of the foot : effects on muscle strength, the foot arch, and dynamic parameters before and after the training. *Journal of Physical Therapy Science*, **26**, 373 – 376. [en \(jst.go.jp\)](https://www.jst.go.jp/)
- Healey, L et Hoogkamer, W, (2022). Longitudinal bending stiffness does not affect running economy in Nike Vaporfly Shoes. *Journal of Sport and Health Science*, **3**, 285 – 292. [Longitudinal bending stiffness does not affect running economy in Nike Vaporfly Shoes - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/journal/S0201579022000000)
- Hollander, K., de Villiers, J. E., Sehner, S., Wegscheider, K., Braumann, K. M., Venter, R., et Zech, A, (2017). Growing-up (habitually) barefoot influences the development of foot and arch morphology in

children and adolescents. *Scientific reports*, **7**, 1 – 9. [Growing-up \(habitually\) barefoot influences the development of foot and arch morphology in children and adolescents - PMC \(nih.gov\)](#)

Holowka, N. B, Wallace, I. J et Lieberman, D. E, (2018). Foot strength and stiffness are related to footwear use in a comparison of minimally- vs. Conventionally-shod populations, *Scientific Reports*, **8**, 1 – 12. [Foot strength and stiffness are related to footwear use in a comparison of minimally- vs. conventionally-shod populations | Scientific Reports \(nature.com\)](#)

Kelly, L. A, Farris, D. J, Cresswell, A. G et Lichtwark, G. A, (2019). Intrinsic foot muscles contribute to elastic energy storage and return in the human foot. *Journal of Applied Physiology*, **216**, 231 – 238. [Intrinsic foot muscles contribute to elastic energy storage and return in the human foot | Journal of Applied Physiology](#)

Kelly, L. A, Lichtwark, G. A et Cresswell, A. G, (2015). Active regulation of longitudinal arch compression and recoil during walking and running. *Journal of the Royal Society, Interface*, **12**, 1 – 8. [Active regulation of longitudinal arch compression and recoil during walking and running - PMC \(nih.gov\)](#)

Kelly, L. A, Lichtwark, G. A, Farris, D. J, et Cresswell, A. G, (2016). Shoes alter the spring-like function of the human foot during running. *Journal of the Royal Society, Interface*, **13**, 1 – 9. [Shoes alter the spring-like function of the human foot during running - PMC \(nih.gov\)](#)

Ker, R. F, Bennett, M. B, Bibby, S. R, Kester, R. C et Alexander, R, (1987). The spring in the arch of the human foot. *Nature*, **8**, 147 – 149. [Untitled-4 \(nature.com\)](#)

Marieb, E. N et Hoehn, K, (2015). *Anatomie et physiologie humaines*. Montréal : Pearson Education.

Mulligan, E, et Cook, P.G, (2013). Effect of plantar intrinsic muscle training on medial longitudinal arch morphology and dynamic function. *Manual Therapy*, **5**, 425 – 430. [\(PDF\) Effect of plantar intrinsic muscle training on medial longitudinal arch morphology and dynamic function \(researchgate.net\)](#)

Prévost, P, et Reiss, D, (2020). *La nouvelle bible de la préparation physique*. Amphora.

Riddick, R, Farris, D. J, et Kelly, L. A, (2019). The foot is more than a spring: human foot muscles perform work to adapt to the energetic requirements of locomotion. *Journal of the Royal Society*,

Interface, **16**, 1 – 11. [The foot is more than a spring: human foot muscles perform work to adapt to the energetic requirements of locomotion - PMC \(nih.gov\)](#)

Rudaz, M, (2019). *Influence du style d'appui au sol sur les capacités de pliométrie et l'économie de course*. Mémoire de fin d'étude, Faculté des sciences de Fribourg, Fribourg. [TM_Rudaz_Manuel.pdf \(rero.ch\)](#)

Shrader, J, Popovich, J, Gracey, G, Danoff, J, (2005). Navicular drop measurement in people with rheumatoid arthritis : interrater and intrarater reliability. *Physical Therapy*, **7**, 656 – 664. [ptj0656.pdf \(silverchair.com\)](#)

Soysa, A, Hiller, C, Refshauge, K et Burns, J, (2012). Importance and challenges of measuring intrinsic foot muscle strength. *Journal of Foot and Ankle Research*, **5**, 1 – 14. [Importance and challenges of measuring intrinsic foot muscle strength | Journal of Foot and Ankle Research | Full Text \(biomedcentral.com\)](#)

Sulowska, I, Mika, A, Oleksy, T, et Stolarczyk, A, (2019). The influence of plantar short foot muscle exercises on the lower extremity muscle strength and power in proximal segments of the kinematic chain in long-distance runners. *BioMed Research International*, **2019**, 1 – 11. [The Influence of Plantar Short Foot Muscle Exercises on the Lower Extremity Muscle Strength and Power in Proximal Segments of the Kinematic Chain in Long-Distance Runners \(hindawi.com\)](#)

Tourillon, R, Gojanovic, B, et Fourchet, F, (2019). How to evaluate and improve foot strength in athletes : an update. *Frontiers in Sports and Active Living*, **1**, 1 – 12. [How to Evaluate and Improve Foot Strength in Athletes: An Update - PMC \(nih.gov\)](#)

Under, C, et Wooden, M, (2000). Effect of foot intrinsic muscle strength training on jump performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, **4**, 373 – 378. [scre_14_317.373_378.tp \(paulogentil.com\)](#)

8. Annexes

Annexe n°1 : tableau des résultats

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kg	kg	kg	kg	ms	ms	cm	cm
Prénom	Ht assis G1	Ht assis G2	Ht deb G1	Ht deb G2	ND Gch 1	ND Gch 2	Ht assis D1	Ht assis D2	Ht deb D1	Ht deb D2	ND Droit 1	ND Droit 2	Force G1	Force G2	Force D1	Force D2	RJ Tc 1	RJ Tc 2	RJ Hauteur 1	RJ Hauteur 2	
Zoé	36	36	27	28	9	8	34	33	28	25	6	8	13,9	11,7	14,9	14,5	209	195	20,75	22,86	
Stéphanie	34	36	34	35	0	1	31	37	31	37	0	0	13,9	11,2	13,9	13,6	177	168	24,5	21,59	
Charlotte	34	31	31	30	3	1	35	32	33	32	2	0	10,6	11,3	12,3	15,5	220	217	21,6	20,6	
Laure	44	43	36	36	8	7	36	35	31	30	5	5	11,3	11	11,3	11,2	250	262	24,52	24,8	
Simon	41	42	36	36	5	6	47	48	45	46	2	2	12,9	14,5	17,7	16,8	182	190	25,28	23,35	
Victor	30	35	27	35	3	0	31	38	31	35	0	3	15,7	16,5	15,9	17	185	191	23,8	21,24	
Hugo	43	40	38	36	5	4	40	40	40	40	0	0	10,8	14,9	14,8	15,5	178	202	27,77	24,88	
Camille	37	31	36	30	1	1	41	34	39	33	2	1	5,3	9,9	9,3	8,2	261	239	17,7	16,84	
Clémence	36	36	28	33	8	3	37	37	31	34	6	3	9,7	10,4	11,7	11,2	199	225	15,9	20,62	
Léa	43	36	37	35	6	1	40	39	36	37	4	2	12	16,5	11,3	15,3	180	190	23,87	28,36	
Laurine	30	30	28	29	0	2	36	31	34	30	2	1	11,3	12,5	11,6	12,2	231	230	15,73	22,08	
Léa	39	38	28	30	11	9	35	39	24	30	11	9	13,8	20,1	17	18,4	192	200	21,05	22,23	
Olivier	42	31	38	30	4	1	40	37	34	32	6	5	19,3	30	17,7	26	174	181	26,2	31,02	
Bilal	44	34	40	33	4	1	43	38	40	35	3	3	21,5	24,6	10,6	22,5	190	178	22,72	20,7	
Camille																					
	38	36	33	33	5	3	38	37	34	34	4	3	13	15	14	16	202	205	22,24	22,94	
	5	4	5	3	3	3	5	4	6	5	3	3	4	6	3	5	28	26	3,70	3,52	
	37	38	33	34	5	4	36	38	34	35	2	3	13	13	14	15	200	204	24,03	22,76	
	5	4	4	3	3	3	6	5	6	7	2	3	2	2	2	2	28	30	2,34	1,70	
	39	34	34	31	5	3	39	36	34	33	5	3	13	18	13	16	204	206	20,45	23,12	
	5	3	5	2	4	3	3	3	5	3	3	3	6	8	3	6	31	25	4,10	4,89	

1 : pré-tests

2 : post-tests

GC : groupe contrôle

GE : groupe expérimental

Moy : moyenne

ET : écart-type

Ht : hauteur

Deb : debout

ND : navicular drop

Tc : Temps de contact au sol

G : gauche

D : droit

Bleu : groupe contrôle

Vert : groupe expérimental

Annexe n° 2: séances de renforcement spécifique du pied

Séance n°1							Séance n°2						
Objectif : renforcement musculaire général des MIP							Objectif : renforcement musculaire orienté des MIP						
Exercice	Répétitions	Récup	Séries	Charges	Matériel	Consignes	Exercice	Répétitions	Récup	Séries	Charges	Matériel	Consignes
Flexion et extension des orteils	20	15 à 20''	3	Aucune	Aucun	Fl. et Ext. Max., pas de balancement du corps	Marche sur orteils	2 A/R sur 20m	30''	1	Aucune	Aucun	Le plus haut possible sur les orteils
Relevé de bord externe	20	15 à 20''	3	Aucune	Aucun	Relever le pied au max., orteils relâchés	Marche sur talons	2 A/R sur 20m	30''	1	Aucune	Aucun	Relever le plus haut possible les orteils
Relevé de bord interne	20	15 à 20''	3	Aucune	Aucun	Relever le pied au max., orteils relâchés	Marche sur orteils avec poids	2 A/R sur 20m	30''	1	5kg	Médecine-ball ou poids	Le plus haut possible sur les orteils, charge en mains
Relevé de talons	20	15 à 20''	3	Aucune	Aucun	Décoller les talons du sol, tempo 3-1-3-0	Marche sur talons avec poids	2 A/R sur 20m	30''	1	5kg	Médecine-ball ou poids	Relever le plus haut possible les orteils, charge en mains
Course aux objets	2'	X	X	Aucune	Objets (papiers, crayons...) Carré de 5 à 6 mètres	2 équipes, en marchant pied en extension, aller chercher le + d'objets possible et les ramener dans son camp. Saisir les objets en flexion d'orteils	Sautillements sur orteils unipodal	1 A/R par pied sur 20m	30''	1	Aucune	Aucun	Sur pointe de pied, en faire le plus possible. Pied armé.
							Sautillements alternés sur orteils	2 A/R sur 20m	30''	1	Aucune	Aucun	Idem en alternant : départ pied D réception pied G

Séance n°3						
Objectif : renforcement musculaire orienté des MIP						
Exercice	Répétitions	Récup	Séries	Charges	Matériel	Consignes
Chenille	2 allers sur 10m avec retour 1 : marche talon puis retour 2 : marche plante	30''	1	Aucune	Aucun	Avancer en s'aidant de la traction des orteils
Sautillements pieds joints	2 A/R sur 20m	30''	1	Aucune	Aucun	Haut sur les orteils, mains sur les hanches, éviter l'affaissement du talon
Course aux objets	2'	X	X	Aucune	Objets (papiers, crayons...) Carré de 5 à 6 mètres	2 équipes, en marchant pied en extension, aller chercher le + d'objets possible et les ramener dans son camp. Saisir les objets en flexion d'orteils
Sautillements sur orteils unipodal	20 par pied	30''	1	Aucune	Sur le tapis de hauteur ou de perche	Sur pointe de pied, résister à la déformation
Sautillements alternés sur orteils	20	30''	1	Aucune	Sur le tapis de hauteur ou de perche	Sur pointe de pied, résister à la déformation
Sautillements pieds joints	20	30''	1	Aucune	Sur le tapis de hauteur ou de perche	Pieds joints, mains sur les hanches

Séance n°4						
Objectif : renforcement musculaire orienté des MIP						
Exercice	Répétitions	Récup	Séries	Charges	Matériel	Consignes
Everson - Plante	10	30''	3	Aucune	Aucun	Pieds à plat, passer sur bord interne pour arriver plante de pied
Inversion – Talon	10	30''	3	Aucune	Aucun	Pieds à plat, passer sur bord externe pour arriver sur talons
Tour de pied	10 par sens de rotation	30''	3	Aucune	Aucun	Passage pointe – inversion – talon – eversion
Chenille	2 allers avec retour 1 : marche talon puis retour 2 : marche plante	30''	3	Aucune	Aucun	Avancer en s'aidant de la traction des orteils
Sautillements pieds joints en carré	10 Avec 1 tour = 1 rep	30''	3	Aucune	4 lattes par personne	Mains sur les hanches, passer sur milieu du carré formé par les lattes à devant puis milieu-derrrière, milieu-D, milieu-G...
Saut en contre-haut	10 par pied	30''	3	Aucune	Step	Sur 1 jambe, se laisser tomber, réception plante sans affaissement du talon

Séance n°5						
Objectif : renforcement musculaire spécifique des MIP						
Exercice	Répétitions	Récup	Séries	Charges	Matériel	Consignes
Tour de pied	10 par sens de rotation	30''	3	5kg	Médecine-ball ou poids	Passage pointe – inversion – talon – eversion
Sautillements à 1 pied en carré	10 Avec 1 tour = 1 rep	30''	3	Aucune	4 lattes par personne	Mains sur les hanches, passer sur milieu du carré formé par les lattes à devant puis milieu-derrrière, milieu-D, milieu-G...
Saut en contre-haut	10 par pied	30''	3	Aucune	Step	Sur 1 jambe, se laisser tomber, réception plante, sans affaissement du talon
Jambes tendues 1 jambe	1 A/R par pied	30''	X	Aucune	Tapis	Jambe tendue, pied armé, avancer en sautillant
Jambes tendues	2 A/R	30''	X	Aucune	Tapis	Mains sur les hanches, effectuer des gammes jambes tendues, pied armé, en appliquant une grande force au sol
Sautillements pieds joints	2 A/R	30''	X	Aucune	Tapis	Pieds joints, mains sur les hanches, pied armé

Séance n°6						
Objectif : renforcement musculaire spécifique des muscles du pied						
Exercice	Répétitions	Récup	Séries	Charges	Matériel	Consignes
Flexion et extension des orteils	20	30''	3	Aucune	Aucun	Fl. et Ext. Max., pas de balancement du corps
Tour de pied	10 par sens de rotation	30''	3	5kg	Médecine-ball ou poids	Passage pointe – inversion – talon – eversion
Jambes tendues 1 jambe	1 A/R par pied	30''	X	Aucune	Tapis	Jambe tendue, pied armé, avancer en sautillant
Marche sur orteils	2 A/R sur 20m	30''	1	Aucune	Tapis de hauteur/perche Aucun	Le plus haut possible sur les orteils
Marche sur talons	2 A/R sur 20m	30''	1	Aucune	Tapis de hauteur/perche Aucun	Relever le plus haut possible les orteils
Sautillements pieds joints	2 A/R	30''	X	Aucune	Tapis de hauteur/perche	Pieds joints, mains sur les hanches, pied armé

A/R = Aller/Retour

Annexe n°3 : exemple de fiche retour donnée aux athlètes

Léa

Age
20 ans

Poids
57 kg

Taille
169 cm

Résultats des tests

GRUPE EXPERIMENTAL

1

CHUTE NAVICULAIRE

entre os naviculaire et partie basse de la voûte plantaire

Basse > muscles du pied forts
Haute > muscles du pied faibles

Premiers tests

Gauche: 6 mm
Droit: 4 mm

Seconds tests

Gauche: 1 mm
Droit: 2 mm

AMELIORATION

2

FORCE DU PIED

Quantité de force que les muscles sont capables de développer

Basse > muscles du pied faibles
Haute > muscles du pied forts

Premiers tests

Gauche: 12 kg
Droit: 11,3 kg

Seconds tests

Gauche: 16,5 kg
Droit: 15,3 kg

AMELIORATION

3

TEMPS DE CONTACT AU SOL

Temps pour développer un maximum de force

Basse > muscles forts et efficaces
Haute > muscles faibles et peu efficaces

Premiers tests

180 ms

Seconds tests

190 ms

CONSTANCE

Moyenne du groupe

1

Premiers tests

Gauche: 5 mm
Droit: 5 mm

Seconds tests

Gauche: 3 mm
Droit: 3 mm

2

Premiers tests

Gauche: 13 kg
Droit: 13 kg

Seconds tests

Gauche: 18 kg
Droit: 16 kg

3

Premiers tests

204 ms

Seconds tests

206 ms

Si chute naviculaire > 10 mm : risque accru de pronation, attention aux blessures
Temps de contact au sol < 180 ms : bien / 180 < Tc < 220 : correct / > 220 : améliorabile

Unités de mesure : mm : millimètres / kg : kilogrammes / ms : millisecondes

Conclusions sur le protocole

Conclusion générale sur le groupe expérimental

Amélioration de la chute naviculaire et de la force du pied gauche

Aucune amélioration pour le pied droit

Aucune amélioration des temps de contact au sol

Remarque générale concernant le protocole

Les bénéfices peuvent être augmentés en continuant les exercices
Après l'arrêt du renforcement, les bénéfices ne se maintiennent pas à long termes (seulement quelques semaines si aucun rappel n'est fait)

Des bénéfices importants ont été constatés dans d'autres expérimentations avec un entraînement plus accru. Des améliorations en courses et en saut ont été observées grâce au travail de pied

9. Résumé

Thématique : Le pied est une structure complexe qui joue un rôle important lors de la course à pied. Depuis plusieurs années, des auteurs ont étudié sa capacité à stocker et à restituer l'énergie à travers ses différentes structures, qu'elles soient passives comme l'arche longitudinale médiale, ou actives comme les muscles intrinsèques du pied. Mais aujourd'hui, la répartition du rôle de ces structures lors de la course est toujours incertaine. Le rôle que peuvent avoir les muscles intrinsèques du pied notamment dans la performance sportive est encore largement étudié.

Objectif : L'objectif de ce mémoire est d'évaluer l'efficacité d'un renforcement spécifique des muscles intrinsèques du pied pour l'amélioration des temps de contact au sol et des qualités pliométriques chez les coureurs de demi-fond et fond en athlétisme. À travers cet objectif, nous souhaitons déceler l'importance du pied dans la réalisation d'une performance en course et en connaître davantage sur la pertinence de son renforcement.

Méthode : L'étude s'est déroulée sur huit semaines. À la suite des pré-tests, les athlètes ont été répartis soit dans le groupe contrôle (n=7) soit dans le groupe expérimental (n=7). Les athlètes du groupe expérimental ont suivi un entraînement spécifique du pied une fois par semaine. La durée totale de l'entraînement était de six semaines. Ce groupe était composé d'athlètes hommes et femmes confondus, de niveau régional en demi-fond et fond. Lors des tests effectués, nous avons évalué les variables suivantes : la hauteur de l'os naviculaire des deux pieds en position assise puis debout, la chute naviculaire des deux pieds, la force des pieds, les temps de contact au sol ainsi que les hauteurs d'envol.

Résultats : Les résultats obtenus démontrent une amélioration sur les tests de hauteur de l'os naviculaire du pied gauche en position assise, de chute naviculaire du pied gauche et de force du pied gauche ($p < 0,05$). En revanche, on note une absence d'amélioration au niveau du pied droit ($p > 0,05$). De même, aucune amélioration significative n'a été démontrée concernant les temps de contact au sol ainsi que les hauteurs d'envol sur le test du Rebond Jump.

Conclusion : Nos résultats permettent d'attester que le renforcement du pied provoque une amélioration de sa posture et de sa force, sans amélioration des temps de contact au sol et des qualités pliométriques. Or, dans la littérature, l'amélioration de la force du pied conduit souvent à une amélioration des performances en course ou en saut. Aujourd'hui, le renforcement du pied est aussi associé à une diminution des blessures du membre inférieur ainsi qu'à l'amélioration de sa mobilité et de sa flexibilité.

Mots-clés : muscles intrinsèques du pied ; renforcement du pied ; biomécanique du pied ; rigidité de l'arche plantaire ; performance en demi-fond / fond

Abstract

Subject : The foot is a complex structure that plays an important role in running. For several years, authors have studied its capacity to store and restore energy through its various structures, whether passive, such as the longitudinal arch, or active, such as the intrinsic foot muscles. However, today, the role of these structures in running is still unclear. The role that the intrinsic muscles of the foot may have in sports performance is still being extensively studied.

Objectives : The aim of this study is to evaluate the efficiency of an specific strengthening of the intrinsic foot muscles in improving ground contact times and plyometric abilities in mid-distance and long-distance runners in athletics. Through this objective, we want to identify the importance of the foot in achieving running performance and learn more about the relevance of strengthening it.

Method : The study was conducted over eight weeks. Following the pre-tests, the athletes were allocated to either the control group (n = 7) or the experimental group (n = 7). The experimental group received specific foot training once a week, during six weeks. This group was composed of men and women of regional level in middle and long distance. During the tests, we evaluated the following variables: the height of the navicular bones of both feet when sitting and standing, the navicular drop (ND) of both feet, the foot strength, the ground contact times and finally the flight heights during the Rebound Jump.

Results : Our results showed an improvement in performance on the height of the left navicular bones, on the left navicular drop (ND) and on the left foot strength ($p < 0,05$). However, no improvement was revealed for the right foot ($p > 0,05$). Likewise, no improvement was determined on the ground contact time test and on the flight heights test ($p > 0,05$).

Conclusion: Our results show that strengthening the foot leads to an improvement in its posture and strength, without improving ground contact times and plyometric qualities. However, in the literature, improvement in foot strength often leads to an improvement in running or jumping performance. Today, foot strengthening is also associated with a reduction in lower limb injuries and improved mobility and flexibility.

Key words: intrinsic foot muscles ; foot strength ; foot biomechanics ; plantar arch stiffness ; mid and long distance performance

10. Compétences

La réalisation de ce protocole m'a permis d'acquérir et de compléter les compétences suivantes :

Créer et adapter un protocole réalisable en fonction du matériel disponible et des besoins du mémoire

Adapter les exercices de renforcement musculaire à la discipline et aux contraintes de temps et de matériel

Gérer les athlètes blessés, *adapter* leurs séances, *favoriser* leur rééducation

Tester les athlètes, *synthétiser* et *communiquer* leurs résultats de façon claire

Se former sur des sujets nouveaux grâce à la littérature