



L'INFLUENCE DE LA POSE DU PIED SUR LES TENDINOPATHIES D'ACHILLE CHEZ LE TRAILER.

Le rôle du Masseur-Kinésithérapeute dans la prévention

Revue de littérature





**L'INFLUENCE DE LA POSE DU PIED SUR LES
TENDINOPATHIES D'ACHILLE CHEZ LE
TRAILER.**

Le rôle du Masseur-Kinésithérapeute dans la prévention

Revue de littérature

Référent de mémoire : Matthieu MAITREPIERRE, Masseur-Kinésithérapeute au centre de rééducation fonctionnelle Divio et au Dijon Football Côte d'Or.

Directrice de mémoire : Cécile LEMOTEUX, Masseur-Kinésithérapeute, cadre formatrice à l'IFMK de Dijon.

Remerciement

Je souhaite adresser des remerciements particuliers à :

Mes frères, Benoit et Julien, leurs petites femmes et leurs enfants ainsi que mes parents toujours présents pour me soutenir et m'aider.

Mon colocataire, Raphael sans qui je n'aurai pas fait ces remerciements. Merci pour tout ce qu'on a partagé ensemble qui restera en nous, tes conseils sur la vie et sur la pratique masso-kinésithérapique.

Monsieur Matthieu Maitrepierre, mon référent de mémoire, pour sa disponibilité, sa motivation et ses conseils qui m'ont permis de garder confiance en moi.

Aux nombreux kinésithérapeutes que j'ai sollicité pour ce mémoire. Et plus particulièrement les kinésithérapeutes :

Du centre du Kinés Sport du Lac à Annecy, **Patrick, Stéphane, Maxime, Adrien et Fabrice**.

Et Du Centre de Kiné du Sport (CKS) de Lyon la Sauvegarde, **Alexandre, Thomas et Eve**.

J'ai appris beaucoup à leur contact, ils m'ont transmis leur passion et leur savoir faire.

Olivier Garcin, Podologue, Posturologue à Chamonix. C'est lors de mon stage chez Olivier que j'ai eu envie de travailler sur ce thème de mémoire. Ses compétences et sa passion pour sa profession m'ont beaucoup apporté sur la pose de pied chez le coureur à pied.

Les amis de mon club le Dijon Single Track et les belles rencontres **de trailers d'Annecy** avec qui nous pouvions partager, échanger et mettre en pratique lors de trails ce mémoire très scientifique et théorique.

Et Dylan, qui grâce à son aide, sa disponibilité, et tout le temps qu'il m'a accordé m'a permis de réussir le concours pour entrer en deuxième année à l'IFMK de Dijon. Merci de m'avoir fait partager ta vision de la kinésithérapie. Merci pour tous tes conseils pour ce mémoire, et leurs mises en pratique lors de nos nombreux trails à Chamonix.

Glossaire

UTMB : Ultra Trail du Mont Blanc

MKDE : Masseur Kinésithérapeute Diplômé d'Etat

FRS : Forces de Réaction du Sol

EMG : ElectroMyoGraphe

FFS : ForeFoot Strike

MFS : MidFoot Strique

RFS : RearFoot Strike

NRFS : No RearFoot Strike

HAS : Haute Autorité de Santé

GL : Gastrocnémien Latéral

GM : Gastrocnémien Médial

TA : Tibial Antérieur

GPS : Global Positioning System

CMV : Contraction Maximale Volontaire

SPECT-CT : Single Photon Emission Computed Tomography – Computed Tomography

Sommaire

<u>Introduction</u>	1
<u>I. Cadre conceptuel</u>	2
I.1. La tendinopathie d'Achille	2
I.1.1. Données Anatomo-Physiologiques	2
I.1.2. Physiopathologie du tendon d'Achille	4
I.1.3. Classification	4
I.1.4. Epidémiologie des tendinopathies d'Achille	4
I.2. Patho-mécanisme dans le cadre de la pratique du trail	5
I.2.1. Le trail : Définition de la Fédération Française d'Athlétisme	5
I.2.2. La tendinopathie du trailer	5
I.3. La pose de pied chez le trailer	7
I.3.1. Le pied, fonctionnement biomécanique	7
I.3.2. Avant-pied, médio-pied, arrière-pied	8
I.3.3. Facteurs intrinsèques et extrinsèques qui influencent cette pose de pied	9
<u>II. Méthodologie</u>	10
II.1. Recherches documentaires	10
II.1.1. Supports de recherches	10
II.1.2. Mots clés	10
II.1.3. Acquisition et sélection des articles	11
II.2. Recueil et organisation des résultats	11
II.3. Démarches personnelles	12
<u>III. Résultats</u>	12
III.1. Influence d'une pose de pied avant pied ou médio pied sur la survenue des tendinopathies d'Achille	13
III.1.1. Influence de l'interface sol/pied lors de l'attaque antérieure : répercussions biomécaniques	13
III.1.2. L'incidence de l'attaque antérieure : répercussions myo-tendineuses	16
III.1.3. Importance d'une pose de pied antérieure dans l'absorption de l'onde de choc et dans la diminution des contraintes. Le pied : rôle d'amortisseur	18
III.2. Influence d'une pose de pied arrière pied (RFS) sur la survenue des tendinopathies d'Achille	21
III.2.1. L'attaque talon : incidence de la chaussure sur la pose de pied et répercussions biomécaniques	22
III.2.2. Les caractéristiques physiques et mécaniques du tendon d'Achille en fonction de la pose du pied du trailer	24
III.2.3. L'incidence de la pose de pied par le talon : création d'un pic d'impact transitoire	25
<u>IV. Discussion</u>	26
<u>Conclusion</u>	30

Introduction

Le développement de la course à pied ces dernières décennies a été suivi d'une augmentation de la prévalence des blessures et spécialement les blessures de sur-utilisation. L'émulation de la course, la quête de la performance ou le besoin d'adrénaline font que les athlètes s'entraînent de plus en plus avec plus d'intensité et sur des distances plus longues.

Les blessures de sur-utilisation, appelées aussi « overuse injuries », représentent entre 50 à 75% de toutes les blessures de courses à pied. « Le tendon d'Achille est le plus souvent impliqué dans ces lésions avec le tendon rotulien » [1]. Almonroeder T et al ont estimé que plus de 74% des coureurs aux USA ont eu une blessure musculo-squelettique qui a provoqué une douleur ou une limitation de leur entraînement durant l'année. Ils nous indiquent que le tendon d'Achille est impliqué à 10% dans les blessures de course à pied [2].

La blessure de sur-utilisation du tendon d'Achille se retrouve majoritairement chez les athlètes qui font des moyennes et longues distances en trail. Ce trouble n'est pas seulement réservé aux athlètes de haut niveau, il touche aussi les coureurs occasionnels. Lopes AD et al indiquent que la tendinopathie d'Achille chez les coureurs d'ultra trail est la blessure principale suivi du syndrome femoro-patellaire [3]. Ce résultat est confirmé par Blondel R qui montre que lors de l'Ultra-Trail du Mont-Blanc (UTMB) 2009, les tendinopathies représentent 27% des pathologies orthopédiques [4].

De mon côté, j'ai pu constater cette tendance importante des tendinopathies d'Achille chez le trailleur, lors de mes stages dans les Centres de Kiné du sport à Lyon et à Annecy ainsi que lors de mon stage chez O. Garcin, podologue du sport à Chamonix.

La question d'un patient que le kinésithérapeute faisait courir sur tapis roulant m'a interpellée. Il nous a demandé « mais comment dois-je poser mon pied ? Par le talon ou par l'avant du pied ? »

L'interrogation de ce patient correspond aux préoccupations actuelles des trailleurs. Chaque magazine de course à pied a son article concernant la pose du pied et le chaussage en relation avec la performance et/ou les blessures. « Barefoot », « five fingers », « minimalistes », « attaque talon », « attaque avant-pied » font partie des sujets actuels du trailleur du débutant au haut niveau. Cette nouvelle tendance c'est largement développée avec l'apparition des « five fingers » et de la course pieds nus le « barefoot ». Nous sommes face à une vulgarisation des principes biomécaniques généralisés et stéréotypés à l'ensemble des coureurs. Le trail c'est démocratisé, les ultra-trails sont de plus en plus à la mode et « un nombre inacceptable de coureurs, entre 30 et 70%, présentent des blessures en lien avec la répétition du stress lié à la course à pied. Cependant **il n'y a pas de consensus sur comment prévenir ces blessures** » [5].

En tant que futur Masseuse-Kinésithérapeute Diplômé d'Etat (MKDE), je me suis interrogée sur l'intérêt d'un travail en amont afin de limiter les blessures du tendon d'Achille chez le trailleur. En analysant les facteurs de risques intrinsèques et extrinsèques qui sont nombreux, la sur-utilisation « overuse injuries » est le motif principal des tendinopathies d'Achille chez le trailleur. Lors de ces nombreuses conférences et sur son site la clinique du coureur, Blaise Dubois avance l'importance de la pose du pied dans la prévention des blessures chez le coureur à pied [6]. Je me suis alors demandée quelle est l'influence de la pose de pied sur le risque de tendinopathie d'Achille chez le trailleur, et si il y avait une pose de pied plus propice pour limiter ce type de traumatisme de sur-sollicitation. La problématique qui c'est alors dégagée de ce questionnement est la suivante :

Quel sera le rôle du Masseur-Kinésithérapeute dans la prévention, afin de limiter la survenue et la récurrence de la tendinopathie d'Achille chez le triatlonniste ?

I. Cadre conceptuel

I.1. La tendinopathie d'Achille

I.1.1. Données Anatomo-physiologiques.

Afin de limiter les blessures et les désagréments liés à la course à pied, il est essentiel de comprendre le fonctionnement du tendon, ses propriétés mécaniques et ses capacités de régénération, qui sont intimement liées à sa composition et à son architecture [7].

Le tendon est un tissu conjonctif dense et peu vascularisé. Cela va diminuer ses possibilités de cicatrisation lors de blessures. Ses fibres de collagène sont organisées en parallèle dans l'axe longitudinal du tendon. Il s'agit d'un « matériau pré-contraint » dont le rôle principal est de résister aux forces qui s'exercent dans l'axe de ses fibres. Ainsi les tendons possèdent l'une des forces de résistance les plus élevées de tous les tissus mous corporels.

Sur le plan macroscopique le tendon est constitué de: [Annexe 1]

- L'enthèse : partie fibro-cartilagineuse avasculaire (donc difficile à cicatriser), en continuité avec l'os. Entre ce point de fixation et l'os existe très souvent une bourse séreuse, poche de liquide dont le rôle est de lubrifier cette zone pour améliorer le glissement.
- L'endomysium/ structure qui assure la jonction entre l'os et le tendon.
- Le corps tendineux : Chaque faisceau de fibres est entouré d'une membrane appelée endotendon. Elle se prolonge d'un côté jusqu'au péri-mysium (qui entoure le muscle et se transforme en péri-tendon) pour former la jonction musculo-tendineuse (en continuité avec le muscle, partie bien vascularisée) et de l'autre côté vers le périoste pour former la jonction ostéo-tendineuse (partie peu vascularisée).
- Le tendon est entouré par une gaine synoviale nommée épitendon ou para-tendon, contenant un liquide lubrifiant : la synovie. Cette gaine, a un rôle de protection pour les fibres tendineuses et facilite le glissement des tendons, comme une corde dans une poulie. L'épitendon est richement vascularisé et irrigue le tendon lui-même. Cet ensemble est innervé par le nerf du triceps sural.

Sur le plan microscopique [Annexe 1] le tendon est constitué par les fibroblastes (environ 20% du volume total) et par une abondante matrice extracellulaire (environ 80% de ce même volume). Cette matrice contient environ 70% d'eau et 30% de collagène de type I et de type III, synthétisé et sécrété par les fibroblastes, ainsi qu'une petite quantité d'élastine (protéine élastique). Le reste de la matrice est composée de longues chaînes d'acides aminés et de glycoprotéines. Le tendon a la particularité d'être formé par différentes structures, allant du collagène à une forme de plus en plus minéralisée se terminant par de l'os cortical. Ce changement graduel du tendon à l'os engendre une modification des propriétés mécaniques du tissu (augmentation de la raideur) diminuant les tensions au niveau de l'insertion du tendon dans l'os. L'unité fondamentale du tendon est le collagène, appelée aussi tropocollagène. Plusieurs molécules de collagène se regroupent dans une micro-fibrille à l'intérieur de laquelle elles sont

disposées à la fois en parallèle et en série. Des ponts d'union existent entre les tropocollagènes. Ces liaisons intra et extra-chaîne sont essentielles à la stabilité du collagène et de la microfibrille. « **Ces liaisons confèrent au tendon sa solidité et lui permet de fonctionner sous des contraintes mécaniques importantes. Plus ces liaisons sont nombreuses et plus le tendon est résistant** » [7].

Cette physiologie attribue au tendon des propriétés particulières :

- Flexibilité : c'est-à-dire la charge maximale admissible. Le tendon d'Achille supporte jusqu'à 300kg.
- Extensibilité : les tendons agissent comme des amortisseurs pour limiter les lésions musculaires : [Annexe 2]
 - Pour une extension inférieure à 4%, le tendon garde un comportement élastique. A l'arrêt de la traction, il retrouve sa longueur initiale.
 - Au-dessus de 4% d'extension, des lésions sont présentes avec des ruptures partielles.
 - A partir de 7% à 8% d'extension, les lésions sont complètes.
- Résistance à l'étirement et aux forces de compression. La grande stabilité mécanique du collagène attribue au tendon ses caractéristiques de résistance et de rigidité permettant la transmission de force du muscle à l'os.
- Adaptabilité
 - Aux différentes contraintes auxquelles le tendon est soumis par des processus d'auto réparation. L'entraînement et le stress mécanique adéquat « ni trop, ni trop peu », sont bénéfiques sur la résistance et la structure tendineuse. En revanche si le stress est supérieur à ses capacités d'adaptation il y aura des lésions de sa structure. Le travail excentrique et l'étirement assouplissent et améliorent la résistance du tendon [6].
 - Capacités d'adaptation du tendon en fonction de leur utilisation. Les tendons sont plus épais et plus denses chez les sportifs. Ils s'enraidissent avec l'âge.
- La vascularisation est hétérogène dans le tendon. Trois sources vasculaires sont identifiées :
 - La jonction myo-tendineuse : c'est la vascularisation la plus importante. Elle dépend en grande partie de celle du muscle. Il va s'agir de traiter le muscle avec le tendon pour vasculariser et améliorer la cicatrisation de celui-ci.
 - La jonction ostéo-tendineuse : où l'origine vasculaire est l'os et le périoste. Il s'agit d'une zone peu vascularisée.
 - Le para-tendon est lui aussi richement vascularisé. Il va irriguer le tendon par imbibition.
- La cicatrisation s'avère malgré tout difficile du fait d'une mauvaise vascularisation globale du tendon surtout au niveau de l'enthèse.

Les gastrocnémiens et le soléaire fusionnent ensemble et se prolongent par le **tendon d'Achille** reliant le triceps sural au calcaneum [8] [Annexe 3]. Il est aussi constitué par le prolongement du fascia plantaire. [Annexe 4]. Il est le plus gros et le plus solide tendon de l'organisme. Il transmet à la fois les forces développées par le triceps sural et reçoit celle provoquée par l'impact du corps au sol. « Le tendon est à ce titre le principal récupérateur d'énergie du corps. Ses sollicitations sont énormes et ses pathologies sont nombreuses » [9].

I.1.2. Physiopathologie du tendon d'Achille

La surcharge mécanique, en intensité et/ou en fréquence, occasionne des lésions de la matrice extra cellulaire. Progressivement, le processus de réparation des cellules de la matrice devient moins efficace. Tout stress mécanique engendre une libération de cytokines. Cela implique des mécanismes, de maturation et de réparation, incomplètes modifiant les propriétés mécaniques du tendon et entraînant des micro-ruptures. [10] **Les tendinopathies sont un échec de réparation en réponse à un stress mécanique.** Jarvinen et al, caractérisent la tendinopathie d'Achille par la combinaison d'une douleur associée à un gonflement diffus ou localisé, dans et autour du tendon, accompagné par une diminution de ses performances [11]. En fonction de la localisation de la lésion nous différencions différents types de tendinopathie : [Annexe 5]

a) Les tendinopathies :

- o Tendinopathie corporeale ou tendinose. (nodulaire, fusiforme, kystique ou calcifiante). Lésion sur le corps du tendon lui-même. Il s'agit d'une usure de la structure du tendon, le tendon se dégrade, ses fibres se cassent, cicatrisent et forment des petits renflements : des nodules. Cet épaissement, cet enraidissement tendineux est en général aisément palpé.
- o Tendinopathie de la jonction myo-tendineuse
- o Tendinopathie de la jonction ostéo-tendineuse ou enthésopathie.

b) les para-ténonites ou péri-tendinites et téno-synovites :

Il s'agit d'un conflit de friction du tendon dans sa gaine tendineuse (péri-tendon) qui correspond à une inflammation des enveloppes : inflammation de la gaine synoviale. Une crépitation est perçue dans ce cas.

c) Les téno-bursites:

Inflammation des bourses séreuses qui permettent le glissement des tendons les uns par rapport aux autres.

I.1.3. Classification

Différentes classifications existent, notamment la classification de Blazina largement utilisée. Elle se réfère à l'expression de la douleur en fonction de l'effort physique. Les différentes classifications sont corrélées ou non à l'expression de la douleur et à l'anatomopathologie. Elles permettent d'affiner le diagnostic différentiel. [12].

I.1.4. Epidémiologie des tendinopathies d'Achille

Dans sa thèse effectuée en 2014, L. Blanché a interrogé 318 professionnels de santé (médecins généralistes, médecins du sport, kinésithérapeutes et podologues) concernant l'incidence du chaussage sur les technopathies de la course à pied. Ses résultats indiquent que la tendinopathie d'Achille est la technopathie (ou pathologie liée à la course à pied) la plus citée [13].

Les résultats de l'étude de LOPES AD et al montrent que la tendinopathie d'Achille touche 50% des athlètes d'endurance et 5,9% des sédentaires. Les **lésions de surcharges répétées représentent 55 à 60%** des cas d'atteinte de ce tendon. Les tendinopathies d'Achille sont les plus fréquemment rencontrées en course à pied et plus particulièrement chez les coureurs

de moyenne et longue distances. Un suivi réalisé sur huit ans, indique que plus de 40% des tendinopathies sont unilatérales, puis évoluent en bilatérale. Le délai de reprise peut dépasser **les 6 mois pour 40% des sportifs**. L'âge est un facteur prédisposant au développement des tendinopathies, les sujets actifs plus âgés (au delà de 40 ans) représentant 70% de la population touchée. On retrouve en moyenne neuf hommes atteints pour une femme. **Chez les coureurs d'Ultra Marathon, les tendinopathies d'Achille comptent parmi les blessures les plus courantes** [3].

Jarvinen et al ont suivi 689 athlètes, compétiteurs et de loisirs, ayant un problème de tendinopathie d'Achille. Leurs résultats montrent que le diagnostic clinique le plus commun des blessures de sur-utilisation du tendon d'Achille est la **para-tendinopathie** ou la tendinose (entre 55% et 65%), suivi des **tendinopathies d'insertion** (entre 20% et 25%) dont 8% à la jonction myo-tendineuse. 3% des patients ont présenté une rupture complète du tendon d'Achille. 89% des patients présentant cette tendinopathie étaient des hommes. Des problèmes de posture du membre inférieur sont trouvés pour 60% des patients [11].

I.2. Patho-mécanisme dans le cadre de la pratique du trail

I.2.1. Le trail : définition de la Fédération Française d'Athlétisme

Le Label FFA (Fédération Française d'Athlétisme) définit les courses « en nature » comme des manifestations pédestres « se déroulant principalement en dehors des routes, sans utilisation ni de matériel alpin, ni de technique alpine, sur un itinéraire balisé (excluant l'utilisation de la boussole). On distingue les « **Trails Découverte** » : d'une distance inférieure à 21km, des « **Trails courts** » : d'une distance supérieure ou égale à 21 km et inférieure à 42 km, des « **Trails** » : d'une distance supérieure ou égale à 42km et inférieure à 80 km, des « **Ultra-Trails** » : d'une distance supérieure ou égale à 80 km » [14].

Le Trail court sur des surfaces instables, irrégulières et variées. Il doit constamment adapter sa foulée aux types de terrain. C'est-à-dire, à l'alternance de montées, de descentes, de sols souples, durs, des racines sous les feuilles, des pierriers, des dalles glissantes. Le pied s'adapte en permanence à ces contraintes externes, la pose du pied ne sera pas identique en montée et en descente. Cette pose de pied va aussi évoluer en fonction de la vitesse de course et de la fatigue musculaire. Les conditions extrêmes (distances, météo, intensité, durées, distances) de cette pratique de course à pied implique une sur-sollicitation du tendon d'Achille à l'entraînement comme en compétition. B. Dubois nous indique que courir sur une surface irrégulière augmente le risque de blessures traumatiques et augmente la proprioception et la variété du schéma de pose de pied. [6]

I.2.2. La tendinopathie du trailer

La démocratisation du trail c'est accompagnée de multiples blessures. Les pathologies liées à la course à pied ou « overuse injuries » sont l'aboutissement d'une accumulation de contraintes mécaniques surpassant les capacités physiologiques d'une structure musculo-squelettique aussi bien osseuse, qu'articulaire, qu'aponévrotique ou tendineuse [13].

En matière de lésions tendineuses liées à la pratique du Trail, la notion de prévention est primordiale. Les facteurs systématiquement relevés favorisant les tendinopathies d'Achille sont : [15]

- une surcharge à l'entraînement (trop de contraintes, trop souvent),
- un terrain ou des conditions météorologiques défavorables,
- l'existence d'une lésion antérieure du même type,
- de problèmes constitutionnels mécaniques au niveau des membres inférieurs
- des déséquilibres musculaires autour de la cheville.

Différents facteurs de risques liés à la course à pied vont générer ces tendinopathies d'Achille :

- **Les Tendinopathies mécaniques** (représentent 98% des tendinopathies):

- Dues à des facteurs extrinsèques (liés à la pratique d'une activité sportive) :

- un excès de traction : De surmenage, de sur-charge, ou de sur-utilisation, « overuse », c'est-à-dire, la répétition de sollicitations trop amples ou trop rapprochées entraîne un glissement des fibrilles entre elles, puis leur rupture. On retrouve dans ce cas plus fréquemment des **tendinopathies corporéales ou des enthésopathies**.

- un traumatisme direct

- des conflits de friction, par frottements répétés, touchant principalement la **gaine du tendon** (péri-tendinites) et les **bourses séreuses** (bursites).

- entraînements, sol, chaussures, matériel, iatrogénèse

- Dues à des facteurs intrinsèques (liés à l'individu) :

- une moindre résistance du tendon

- Inactivité ou hypoxie dans les zones du tendon trop peu vascularisées

- Mais aussi, l'âge, la longueur et l'extensibilité musculo tendineuse, les causes anatomiques, le contexte métabolique, dentaire, la fatigue.

Les distances hebdomadaires et les antécédents de tendinopathie d'Achille sont les deux facteurs de risque majeur qui ressortent de façon consensuelle chez le trailer. [11]

- **Autres types de tendinopathies** :

- inflammatoires

- Infectieuses

- Métaboliques

- Microcristalines

- Tumorales

B. Dubois quant à lui, parle de recrutement du tendon d'Achille en « ni trop, ni trop peu ». Il va s'agir de solliciter le tendon en restant dans la zone physiologique, l'ondulation des fibres de collagène disparaît lors de la sollicitation et revient au relâchement de la traction. Les fibres tendineuses sont alignées. La traction agit sur la rigidité de la fibre. La fibre revient à sa longueur initiale si elle ne dépasse pas un certain seuil. Ce sont les principales sollicitations sportives dans la zone physiologique. Si la tension augmente il va y avoir l'apparition de micro-ruptures (rupture partielle). Si la tension augmente encore il y aura rupture macroscopique avec traction et cisaillement entre les fibres, jusqu'à la rupture totale [6]. [Annexe 2]

Il en ressort avec Tam N et al, que la tension exercée sur le tendon d'Achille, est le paramètre mécanique influençant le plus directement l'accumulation de dommages et de blessures de ce tendon [16].

Pour résumer, Paavola M et al confirment que l'étiologie d'une blessure par sur-utilisation du tendon d'Achille **est multifactorielle. L'erreur d'entraînement est notée pour 60 à 70%** des blessures en course à pied (Courir sur une distance trop longue ou à une intensité trop élevée, augmenter la distance ou l'intensité trop rapidement). La monotonie, l'asymétrie, la répétition d'une mauvaise technique de course ou une technique de course non adaptée et la fatigue, sont les facteurs de risque d'une blessure du tendon d'Achille par sur-utilisation. Les mauvaises conditions météorologiques, une surface dure ou glissante peuvent aussi promouvoir des pathologies du tendon d'Achille. **Un mauvais alignement et des erreurs biomécaniques ont une incidence chez les deux tiers des athlètes ayant des problèmes de tendon d'Achille.** Cependant les mécanismes par lesquels cette pathologie apparaît sont controversés. On retrouve ainsi différentes hypothèses comme le mauvais alignement de la cheville avec une hyper pronation du pied. Ou encore la limitation de mobilité de l'articulation sub-talaire et la diminution du taux de mouvement de la cheville. Le varus de l'avant-pied semble aussi être corrélé avec le risque de tendinopathie d'Achille. De même que l'augmentation du pied en inversion et la diminution de la dorsiflexion de cheville avec un genou en extension seraient associés aux tendinopathies d'Achille. Un mauvais alignement ou une limitation de mobilité de la cheville pourrait être un facteur de risque chez nos patients trailers. [1]

En quoi la pose de pied pourrait augmenter ou diminuer les tractions sur le tendon d'Achille ? Quelles sont les différentes poses de pied que l'on retrouve chez le trailer ?

I.3. La pose de pied chez le trailer

I.3.1. Le pied, fonctionnement biomécanique

Le tendon d'Achille est étroitement lié au triceps sural et au fascia plantaire, ainsi il est mis en tension lors d'un travail excentrique du triceps sural. Cette mise en tension va se cumuler avec la tension du fascia plantaire lors d'une réception sur l'avant-pied. Le court fléchisseur des orteils forme à la suite du triceps sural un « appareil tricipito-calcanéo-plantaire » faisant relais au niveau du calcanéus. Il s'agit d'une chaîne fonctionnelle liée à l'aponévrose plantaire. Cette chaîne fonctionnelle est aussi reliée à la « chaîne calcanéo-métatarso-phalangienne », qui joue un rôle tant dans le soulèvement de la voûte que dans la propulsion sur l'avant-pied. Le fascia plantaire, l'architecture polyarticulée du pied et l'appareil musculo-tendineux vont jouer un rôle dans l'amortissement et la propulsion notamment par restitution d'énergie. Tous ces éléments seront mis en tension lors d'une réception sur l'avant-pied. L'attaque avant-pied engage les muscles extrinsèques et intrinsèques de l'arche **en mettant en charge l'arche longitudinale du pied dans les trois plans** [17]. [Annexe 6]

I.3.2. Avant-pied, médio-pied, arrière-pied

Des techniques dynamographiques, enregistrant les forces de réaction du sol (FRS) sur le pied, permettent l'étude biomécanique de la foulée. Ces techniques sont souvent couplées à la cinématographie 3D analysant le positionnement des différents segments de corps au cours du temps. Un enregistrement électromyographique (EMG) est également utilisé en complément. Les composantes de la force de réaction au sol sont enregistrées par une plate forme de force. La force de réaction au sol est la force qui lutte contre la force de gravité et qui peut dépasser plusieurs fois le poids du corps.

Deux techniques permettent de définir le type de pose de pied.

Lors de la première technique, les pieds sont filmés pendant la course. La pose de pied au sol est définie par l'angle formé au moment de l'impact par l'horizontale du sol et de la semelle. Ces mesures sont effectuées en réalisant des arrêts sur image. L'angle de pose du pied lors d'une pose de pied avant-pied est inférieur à $-1,6^\circ$ (c'est-à-dire que la cheville est en flexion plantaire au contact). L'angle de pose du pied en réception médio-pied est compris entre 8 et $-1,6^\circ$. Lors de l'attaque talon l'angulation pied/sol est de 8° .

La deuxième technique enregistre les forces exercées par le coureur lors du contact du pied au sol, en utilisant une plate forme de force ou un tapis dynamométrique. La classification sur l'index de pose de pied utilise le centre de pression lors de la charge maximale pendant la pose de pied. Le coureur avec une réception talon a moins de 33%, le coureur médio-pied a entre 34% and 66%, et le coureur avant-pied a au moins 67%. [5]

Dans les deux cas ces méthodes présentent des limites expérimentales. La première permet d'étudier la pose de pied en condition extérieure mais sur quelques foulées, seulement entre une et trois. La seconde méthode permet d'étudier un nombre de pas quasiment infini mais seulement en condition de laboratoire sur tapis dynamométrique ou sur une plate forme de force. Une troisième technique a alors été mise récemment au point par le Laboratoire de Physiologie de l'Exercice (Universités de Saint-Etienne et de Savoie) afin de coupler les deux approches, quantitative (nombre de foulées) et qualitative (analyses sur le terrain). Cette méthode analyse la foulée en continu et sur un nombre de pas quasi illimité in situ, incluant la pente, la vitesse et le terrain. Deux accéléromètres sans fil synchronisés, sont positionnés sur la chaussure au niveau du talon et de l'avant-pied. La pose du pied entraîne un pic d'accélération qui est consigné par le capteur. Si le capteur associé au talon présente un pic d'accélération juste avant celui du capteur des orteils, alors la pose de pied est en position d'attaque talon. Le raisonnement est inversé pour une attaque avant-pied. Si les deux accéléromètres présentent des pics séparés de seulement moins de 20 millisecondes, il s'agit d'une pose de pied à plat (médio-pied) [16].

Giandolini M distingue trois types de techniques de pose de pied en course [18] : [Annexe 7]

1. La prise d'appui avant-pied ou forefoot strike (FFS) est caractérisée par un contact initial des métatarses. L'avant du pied se pose avant la pose plus ou moins marquée du talon pour repartir avec une impulsion avant-pied. L'angle de pose de pied est inférieur à $-1,6^\circ$. Ce pattern est représenté par environ 5% des coureurs. Le coureur va prendre appui au sol, juste en dessous de la tête du 4^{ème} et 5^{ème} métatarsien, par la plante du pied. Lors de la prise d'appui avant-pied, le mouvement de la flexion plantaire (appui au niveau de la tête des métatarsiens) à la flexion dorsale (descente du talon), va se faire sous le contrôle des fléchisseurs plantaires et du tendon d'Achille. Cette organisation, permet au système triceps sural/tendon d'Achille

d'emmagasiner et de restituer l'énergie élastique pour l'impulsion. Le pied se place naturellement en légère inversion. Cette attaque induit une pose de pied sous le centre de gravité, avec une légère flexion de hanche et de genou, la cheville est en flexion plantaire, le tibia est vertical, avec une répartition majeure du poids sur la partie la plus large du pied. **Il s'agit d'une « chaîne de flexion » qui à la particularité d'amortir les contraintes et de dissiper l'onde de choc** [19].

2. L'attaque à plat ou midfoot strike (MFS) est caractérisée par un contact quasi simultané des métatarses et du talon avec le sol. L'angle de pose de pied est compris entre 8 et -1,6°. Ce pattern est représenté par 15% des coureurs. Les caractéristiques biomécaniques de cette pose de pied sont similaires à l'attaque avant-pied.

3. L'attaque talon ou rearfoot strike (RFS) se caractérise par un contact initial entre le pied et le sol par le talon. Avec une angulation pied/sol de 8°. Ce pattern est représenté par environ 80% des coureurs. Le coureur prend appui au sol du milieu vers l'extérieur du talon, juste en dessous de l'articulation de la cheville. La cheville est en flexion dorsale. Une flexion plantaire passive se réalise tout au long de l'appui jusqu'à l'impulsion sous le contrôle du tibia antérieur. Le pied se pose sur le calcaneum, en avant du centre de gravité, la hanche est fléchie et le genou est tendu, la cheville est en flexion dorsale, avec une pose talon en avant. **Il s'agit d'une « chaîne d'extension » sans amortissement des contraintes** [19].

4. Une quatrième catégorie de pose de pied correspond à l'attaque pointe de pied « toe strike ». Le talon ne touche jamais le sol [20]. Cette pose de pied est retrouvée chez les sprinters. Elle ne sera pas abordée dans ce mémoire.

Ces pourcentages évoluent en fonction de la vitesse de course, de la distance, du niveau de performance, du type de chaussage et des individus.

I.3.3. Facteurs intrinsèques et extrinsèques qui influencent cette pose de pied

De nombreux paramètres influencent la biomécanique de cette pose de pied :

- Par des facteurs intrinsèques : vitesse, fatigue, niveau de pratique, antécédents de blessures.
- Par des facteurs extrinsèques : pente, surface, chaussure, dénivelé, entraînement, compétition, vitesse, temps, distance.

Cependant ces paramètres sont difficile à analyser, à quantifier, à paramétrer et à normer.

La chaussure est un facteur essentiel qui va influencer la dynamique de la pose de pied. Lieberman DE et al, montrent que les poses du pied sont variables en fonction des sujets et des groupes mais leur étude confirme que les coureurs habitués à porter des chaussures sont pour la majorité en attaque talon [21]. En revanche, les groupes coureurs barefoot utilisent plus souvent une attaque avant-pied, qu'ils soient pieds nus ou chaussés. B Dubois parle de « comportement de modération d'impact » [6].

La vitesse et le niveau de pratique vont aussi largement influencer cette pose de pied [21]. Les sprinters ont une pose de pied exclusivement avant-pied, alors que 75% des coureurs d'endurance sont avec une attaque talon. La course avant-pied offrant plus d'efficacité, plus de rapidité et plus d'énergie cinétique restituée.

II. Méthodologie

II.1. Recherches documentaires

II.1.1. Supports de recherche

Mes recherches se sont étendues du mois d'Août jusqu'au mois de décembre 2015. Ainsi j'ai consulté :

- des ouvrages : Dufour et Pillu [17], Brigaud F. [19], Kamina P et al [8].
- des sites internet : Volodalen [9], La clinique du Coureur de B. Dubois [6], FFA [14]
- La Haute Autorité de Santé (HAS) [22]. Je n'ai rien trouvé sur le site de la HAS pouvant apporter des éléments de réponses à ma problématique.
- Le site Legifrance qui indique que « La pratique de la masso-kinésithérapie comporte la promotion de la santé, la prévention, le diagnostic kinésithérapique et le traitement des troubles du mouvement ou de la motricité de la personne » [23].
- des revues, des articles et des publications :
 - les magazines d'actualité kinesithérapique français : Kinésithérapie Scientifique, Kiné actualité et Kiné la revue. Mme Martinot bibliothécaire de l'IFMK de Dijon m'envoyait les articles payants auquel je n'avais pas accès.
 - Le magazine Zatopek
 - La grande majorité des articles constituant mon mémoire a été trouvée par recherche numérique sur différentes bases de données : PubMed, Google Scholar, Science Direct, Em-Consult, Kinedoc, Cismef, Resarchgate.

Un tableau récapitulatif m'a permis de répertorier les articles en fonction des mots clés choisis dans les différentes bases de données :

Date	Sources interrogées	Mots clés utilisés	Résultats
------	---------------------	--------------------	-----------

II.1.2. Mots clés

Afin de répondre à ma problématique de façon rigoureuse, j'ai commencé par définir les mots clés de mon étude. Puis je les ai organisé entre-eux à l'aide des opérateurs booléens : ou/or, and/et. Je me suis ensuite rendue sur le site MeSH (Medical Subject Headings) pour la traduction et l'arborescence de ces mots clés afin d'effectuer mes recherches sur les bases de données internationales.

Mots clés français : course à pied, tendon d'Achille, tendinopathie, tendinite, avant-pied, traumatisme, traumatismes des tendons, trail, impact, pose de pied, épidémiologie, tendinose, paratendinopathie, enthésopathie, bursite, paratendon.

Mots clés anglais : running, Achilles tendon, tendinopathy, tendinitis, forefoot, injuries, tendon injuries, impact, foot strike pattern, epidemiology, tendinosis, paratendinopathy, peritendinitis, enthesopathy, insertional disorders, insertional tendinopathy, bursitis, paratenon

II.1.3. Acquisition et sélection des articles

Je lisais dans un premier temps le titre de l'article, le résumé, la méthodologie et la conclusion afin de sélectionner les études les plus pertinentes permettant de répondre à ma problématique.

Ainsi mes critères d'inclusion étaient les suivants :

- La pertinence du titre.
- Les articles parus après 2005.
- Les études menées exclusivement sur les humains.
- Les articles s'intéressant à la foulée en course à pied et plus particulièrement en trail.
- Les articles traitant de la prévention des tendinopathies achilléennes en course à pied.
- Une méthodologie cohérente avec un nombre de patients supérieurs à 10.
- Quand cela était mentionné j'ai pris en compte l'impact factor de la revue (plus il est élevé et plus la revue est influente) Sur 26 articles : [Annexe 8]
 - 2 articles ont un impact factor en-dessous de 1
 - 5 articles ont un impact factor au-dessus de 5

Mes critères d'exclusion :

- Articles sans lien direct avec mon sujet.
- Articles abordant la pronation ou la supination de l'avant-pied ou le valgus, varus de l'arrière-pied.
- Les études réalisées sur les sprinters (coureurs de vitesse sur distances courtes)
- Articles dont la source n'était pas connue
- Articles non disponibles en intégralité

La quasi-totalité de mes articles est issue de la littérature anglophone. La plupart des études répondant à ma problématique a été recueillie sur PubMed. La grande partie de ces articles étaient payant :

- soit je n'ai pas réussi à y avoir accès,
- soit j'ai obtenu ces articles en envoyant un mail aux auteurs concernés
- soit je récupérais les articles sur le moteur de recherche Researchgate (la majorité de mes articles ont été obtenue via ce site)
- soit la documentaliste de la bibliothèque de l'IFMKD me procurait ces articles

II.2. Recueil et organisation des résultats

Lors de mes lectures, j'organisais mes résultats à l'aide d'un tableau récapitulatif présenté ici : [Annexe 16]

Auteurs, Année	Objectifs de l'étude	Protocole utilisé	Résultats	Intérêt pour le mémoire
----------------	----------------------	-------------------	-----------	-------------------------

Tous mes articles sont classés dans un tableau indiquant l'impact factor pour chacun d'entre eux. [Annexe 8]

Etudes	Année	Type d'étude	Source	Impact Factor
--------	-------	--------------	--------	---------------

II.3. Démarches personnelles

En parallèle de mes recherches informatiques et livresques, j'ai pris contact avec différents professionnels de santé, trailers, chercheurs, susceptibles de m'aider dans cette étude afin d'enrichir les réponses à ma problématique. Ces personnes m'ont fait partager leur expérience personnelle et professionnelle ainsi que pour la plupart d'entre eux leur passion de la course à pied. Nous avons ainsi pu échanger sur la place du kinésithérapeute dans la prévention des tendinopathies d'Achille lors du Trail.

Ma passion pour le Trail et mes nombreuses questions sur la prévention des tendinopathies d'Achille en course à pied m'ont amenée à réaliser mon stage d'observation de deuxième année chez M. Garcin podologue posturologue à Chamonix spécialisé dans le Trail et le chaussage en ski. Il préconisait pour limiter les blessures en Trail « moins de chaussures, moins de bruit, plus de fréquence ». Sa conception s'appuie largement sur des recherches de Blaise Dubois la clinique du coureur [6].

J'ai également échangé avec de nombreux kinésithérapeutes passionnés dans le domaine du sport notamment, Mme Garcin MKDE, responsable de l'organisation des kinésithérapeutes de l'UTMB depuis 11 ans. Mais aussi avec les kinésithérapeutes du Centre de kiné du sport du lac d'Annecy et le centre de kiné du sport de Lyon la Sauvegarde où j'ai effectué mes stages de 2^{ème} et 3^{ème} année.

Afin de rendre cette approche théorique plus concrète j'ai eu l'occasion de tester des prototypes de baskets Salomon et Hoka avec M. Mermoud créateur et inventeur du concept Hoka. Il m'a expliqué le concept de leur « chaussure maximaliste » conçue au départ pour la descente et la prévention des blessures en course à pied. Cette rencontre m'a permis d'avoir un regard plus objectif par rapport à mon idée initiale s'appuyant sur B. Dubois avec une vision très minimaliste de la course à pied.

Un questionnaire réalisé auprès de trailers débutants, confirmés et de haut niveau m'ont permis d'étoffer mon hypothèse initiale sur la pose de pied et les tendinopathies d'Achille. Je sortais ainsi du cadre théorique et scientifique pour avoir une approche plus concrète : la vision et le ressenti des trailers eux-mêmes sur leur pose de pied et la prévention des tendinopathies d'Achille. J'ai ainsi échangé avec des trailers de tous niveaux.

III. Résultats

Cette troisième partie reprend les différents articles analysés concernant l'influence de la pose de pied par rapport à la survenue des tendinopathies d'Achille due à une sur-sollicitation.

La caractérisation des types de pose de pied, avant-pied, médio-pied et arrière-pied, est arbitraire. Il n'existe pas trois mais un continuum de pose de pied en fonction du point d'impact plantaire initial. Ce découpage en trois modèles, permet de décrire plus facilement les différences biomécaniques induites par cette pose de pied [13]. Cependant, très peu d'études ne distinguent dans leurs analyses les coureurs attaquant le sol avec l'avant du pied de ceux attaquant le sol avec le médio-pied. **Ainsi, l'analyse de mes résultats s'appuie sur la distinction entre les coureurs abordant le sol par le talon de ceux abordant le sol par l'avant ou le médio-pied.**

Mes recherches se sont attachées à répondre à la question suivante : Y-a-t-il une différence de sollicitation du tendon d'Achille entre l'attaque avant ou médio-pied et l'attaque talon pouvant entraîner des tendinopathies d'Achille lors des trails ?

Notre hypothèse de départ s'appuie sur le fait que le tendon d'Achille sera sollicité différemment en fonction de la pose de pied. Avec chez les coureurs de type RFS plus de « pathologies osseuses » dues à la force d'impact au sol, significativement corrélées avec l'attaque talon (douleurs au niveau des genoux, des hanches, lombaires, périostites tibiales, syndrome fémoro-patellaire, fascites plantaires et fractures de stress). Et chez les coureurs de type FFS, présentant plus de pathologies myo-tendineuses dues aux contraintes exercées au niveau du tendon d'Achille par la sollicitation accrue du triceps sural et des muscles intrinsèques du pied. (Tendinopathie d'Achille, douleurs aux pieds, et des fractures au niveau des métatarses.)

Daoud AI et al, nous exposent trois raisons de tester la relation entre la pose de pied et le taux de blessures : [24]

1. la pose de pied au sol implique une cinématique disparate sur l'extrémité du membre inférieur
2. la pose de pied au sol implique une sollicitation différente des structures myo-tendineuses
3. la pose de pied au sol génère des contrastes cinématiques spécifiques à l'impact.

Nous analyserons chacune de ces relations dans nos deux parties. La première partie traitera l'influence de la pose de pied FFS ou MFS sur le tendon d'Achille et la seconde partie traitera l'influence de la pose de pied RFS sur le tendon d'Achille.

III.1. Influence d'une pose de pied avant pied ou médio-pied sur la survenue des tendinopathies d'Achille

III.1.1. Influence de l'interface sol/pied lors de l'attaque antérieure : répercussions biomécaniques

Nous verrons dans cette partie que les chaussures influencent la pose de pied et la foulée du coureur. Ainsi les coureurs « minimalistes » et les coureurs pied nus ou « barefoot runners » auront préférentiellement une réception au sol avec l'avant du pied en premier.

Dans leur étude, Esculier et al, ont sollicité 42 experts issus de 11 pays, afin de définir de façon optimale le terme de « chaussure minimaliste ». Ainsi la définition suivante, des chaussures minimalistes, a été validée par 95% des participants : chaussure fournissant une interface minimale avec le mouvement naturel du pied, un faible écart entre l'avant et l'arrière pied (drop), une chaussure légère et de faible hauteur, ainsi que l'absence de système de contrôle et de stabilité. Traduit de la définition anglaise : « Footwear providing minimal interference with the natural movement of the foot due to its high flexibility, low heel to toe drop, weight and stack height, and the absence of motion control and stability devices » [25].

Dans leur article, Goss D et al, ont sollicité 2509 coureurs afin d'évaluer la relation entre le type de chaussure, la pose de pied et l'incidence des blessures. Seuls 904 coureurs ont finalisé l'étude. Ils ont été recrutés parmi les militaires, les clubs de course à pied et les étudiants de l'Université de Caroline du Nord. Cette étude consistait à répondre à 41 questions pendant

une période de 16 mois. Une banque de données a analysé et comparé les questionnaires. Les résultats de cette recherche indiquent que la **sélection de chaussure est significativement associée à la pose de pied**. ($\chi^2=143.4$, $P<.001$). Ainsi nous retrouvons chez les coureurs « barefoot » ou « minimalistes » plus de pose de pied antérieure que chez les coureurs utilisant des chaussures types « traditionnels ». **85% des coureurs « pose de pied antérieure » courent en barefoot ou en minimaliste**. En plus de ce lien entre la pose de pied et la chaussure, cette étude met aussi en avant une corrélation entre la pose de pied et les blessures. Cet article nous indique que les coureurs expérimentés avec des minimalistes reportent moins de blessures globales et moins de blessures spécifiques que les coureurs chaussés traditionnellement. Les coureurs chaussés de façon « traditionnelle » ont 3,41 fois plus de risque de se blesser que les coureurs minimalistes. (46,7% chez les coureurs type « traditionnels » contre 13,7% chez les coureurs type « minimalistes » sur une population de 888 coureurs interrogés). L'incidence des blessures en attaque talon est de 52,4%, en attaque médio-pied de 24,7%, et en attaque avant-pied de 22,8%. **Les coureurs avant-pied reportent donc moins de blessures que les coureurs talons**. Nous pouvons cependant attirer l'attention sur le fait que ces résultats peuvent être biaisés par la charge d'entraînement. Il est relevé un nombre de kilomètres hebdomadaire moindre chez le coureur minimaliste avant-pied [26].

L'objet de l'étude randomisée de Hollander et al, était de montrer l'influence des conditions de chaussage sur la cinématique de course et surtout d'élucider le possible mimétisme de la course avec des chaussures minimalistes par rapport à la course nus pieds. 35 coureurs (dont 22 hommes et 13 femmes) ont participé à cette étude. Le protocole consistait à les faire courir sur un tapis de course à trois vitesses différentes utilisant pour chaque vitesse quatre conditions de chaussages : pieds nus, chaussures minimalistes sans amorti, chaussures minimalistes avec amorti et chaussures de course standard. Une analyse cinématique en 3D relevait les angles des genoux et des chevilles à l'appui initial, le taux de RFS, la fréquence et la longueur des pas. Les résultats montrent que les **conditions de chaussages et la vitesse de course influencent significativement ($p<0,001$) l'angle de la cheville à la pose de pied ainsi que la longueur et la fréquence des pas**. Une différence significative entre ces paramètres est aussi relevée ($p<0,001$) entre les coureurs nus pieds et les trois autres conditions de chaussages. **Le taux d'attaque talon était le moins fréquent chez les coureurs pieds nus** (58,6% à 3,33m/s) suivi par les coureurs portant les chaussures minimalistes sans amorti (62,9%), puis les coureurs avec les minimalistes avec amorti (88,6%) et enfin les coureurs avec les chaussures standards (94,3%) [27].

L'étude de Lieberman et al est menée sur 5 groupes de coureurs : 8 amateurs, athlètes d'Harvard habitués aux baskets, 14 athlètes Kenyans de hauts niveaux portant des baskets après leur adolescence, 8 minimalistes barefoot, 16 coureurs n'ayant jamais porté de chaussures : kenyans allant à l'école pieds nus, et 17 enfants habitués aux baskets. Ces auteurs ont comparé la cinématique de la pose de pied des coureurs d'endurance en fonction de leur passé sportif (coureurs habituellement chaussés ou coureurs pieds nus). Les sujets ont tous des marqueurs sur leurs articulations pour l'analyse cinématique. Le test est effectué sur une piste indoor de 20m de long avec une plate forme de force afin d'enregistrer la force verticale de réaction au sol. Après un échauffement de course sur la piste, ils ont entre cinq et sept passages par condition de course avant-pied et talon. Les résultats **montrent que le groupe des coureurs nus pieds et le groupe des coureurs minimalistes utilisent préférentiellement une attaque avant-pied ou médio-**

pied en condition pieds nus ou chaussée. Cette stratégie réduit les pressions sous le talon et augmente celles sous l'avant-pied. D'un point de vue biomécanique on note que lors de la pose FFS, la flexion du genou augmente, la cheville est en flexion plantaire lors de la réception au sol, l'appui est sous le centre de gravité. Il montre aussi que le port de chaussures induit des changements cinématiques. Retirer les baskets, à un athlète habitué à en porter, peut l'amener à adopter une foulée différente avec une diminution de **la longueur des pas et du temps de contact au sol, une accélération de la fréquence des foulées et une augmentation de la flexion plantaire et de la flexion du genou.** Après un temps d'adaptation, ces changements s'accompagnent d'une diminution de la vitesse de la force de réaction au sol comparativement à la condition chaussée [21].

Les chercheurs du Laboratoire Motricité Humaine Education Sport et Santé (LAMHESS) en collaboration avec le laboratoire de Physiologie de l'Exercice de l'Université de Savoie ont analysé en condition de course, in situ, les variables cinématiques de la foulée de Kilian Jornet, - coureur considéré comme un des meilleurs trailers au monde -. Cette étude s'est déroulée lors de la Kilian's Classik, course de 45km avec 1700m de dénivelé positif. K. Jornet était équipé de trois capteurs, deux sur les chaussures et un sur le tibia synchronisé à un GPS (Global Positioning System) afin d'investiguer les effets de la vitesse de course, du dénivelé et de la fatigue musculaire sur les variables cinématiques et sur la force d'impact au sol. Seuls les 20 premiers kilomètres de courses ont pu être enregistrés du fait d'un manque d'autonomie des batteries du GPS. Cependant cette étude a permis d'analyser la pose de pied en condition de trail, sur des sentiers et avec la fatigue musculaire associée, sur plus de 5000 pas. Les données cinématiques de cette étude montrent que **K. Jornet n'utilise pas un seul type de pose de pied.** Sur l'ensemble des 20km de course enregistrés, sa pose de pied se répartit en moyenne à 18% de RFS, 33% de MFS et 49% de FFS avec une attaque avant-pied qui prédomine. Il est noté une augmentation de l'attaque talon au fur et à mesure que la course avance. **Lors des montées l'attaque avant-pied est privilégiée ce qui augmente l'activation des fléchisseurs plantaires.** Afin d'économiser ces muscles, quand la fatigue est plus présente K. Jornet modifie son pattern global de pose de pied en augmentant l'attaque par le talon au cours de la course. **Malgré le fait que Kilian court sur des distances longues avec des baskets et en trail il conserve sur la globalité du parcours sa foulée avec sa pose de pied FFS. Cette pose de pied va évoluer en fonction du dénivelé et de la fatigue musculaire** [28]. [Annexe 9]

Ryan M et al, analysent, dans leur étude randomisée, les effets cliniques de trois différents modèles de chaussures (basket neutre, basket partiellement minimaliste et basket minimaliste : five-finger) sur 99 coureurs hommes et femmes, âgés de 19 à 50 ans. Le groupe contrôle s'entraînait avec des baskets neutres. Les données anthropométriques de chaque coureur sont enregistrées avant et après un programme de 12 semaines d'entraînement pour la préparation à une course de 10 km. Les détails des entraînements, les antécédents de blessures, l'instabilité de cheville et l'échelle visuelle analogique pour les douleurs sont pris en compte dans cette étude. Le type de pose de pied est analysé pour chaque coureur. Les résultats de cette étude montre que les coureurs « five fingers full minimaliste » **adoptent préférentiellement une pose de pied avant-pied ce qui engendre une plus grande et inhabituelle charge du tendon d'Achille et du triceps sural. La pose de pied au sol médio ou avant-pied implique une sur sollicitation des fléchisseurs plantaires ce qui majore les contraintes mécaniques appliquées au tendon d'Achille allant de 1 à 15%. Courir avec des chaussures minimalistes semble**

augmenter la probabilité d'avoir une blessure, avec pour les minimalistes purs l'augmentation des douleurs au mollet et au tibia [29].

Ces différentes poses du pied induisent des sollicitations musculaires et tendineuses différentes.

III.1.2. L'incidence de l'attaque antérieure : répercussions myo-tendineuses

Nous verrons dans cette partie que le coureur avant-pied sollicite de façon importante les structures musculo-tendineuses de la voûte plantaire ainsi que les fléchisseurs plantaires ce qui majore le risque de tendinopathie d'Achille par surcharge mécanique sur ce tendon.

Lors de l'étude de Shih Y et al., l'activité musculaire, du droit fémoral, du tibial antérieur, du biceps fémoral, et des gastrocnémiens, est enregistrée sur 12 hommes et dans 4 conditions de course différentes : pieds nus attaque avant-pied, course pieds nus attaque talon, course chaussée attaque avant-pied et course chaussée attaque talon et lors de trois phases (50ms avant la pose du pied, à la pose du pied et quand le pied quitte le sol) [Annexe 7]. Les résultats électromyographiques montrent **une activité significativement plus importante des muscles gastrocnémiens et du tibial antérieur lors de la course en attaque avant-pied par rapport à une réception talon lors de la phase de pré-activation musculaire et lors de la phase d'appui** que ce soit en condition pieds nus ou chaussée. [Annexe 10]. Aucune différence n'est observée pour tous les muscles enregistrés lorsque le pied quitte le sol. L'augmentation de l'activité musculaire de ces muscles lors de la course avant-pied représente une charge importante pouvant occasionner des blessures. Bien entraînés, les gastrocnémiens assurent un amorti naturel pour le coureur. Cependant un entraînement excessif en contraction excentrique lors d'une pose de pied FFS implique un recrutement plus important des fibres de ces muscles et une traction significative au niveau du tendon d'Achille. Cette surcharge majore le risque de blessures de ce tendon pouvant générer des tendinopathies d'Achille. Cette activité significativement plus importante des gastrocnémiens s'explique d'un point de vue biomécanique. Lors de la course en FFS, le pied est posé avec une flexion plantaire, laquelle est suivie d'une flexion dorsale, contrôlée de façon excentrique par les fléchisseurs plantaires. **Ce travail excentrique engendre des contraintes importantes sur le tendon d'Achille**, avec comme nous avons vu dans la physiologie du tendon des lésions qui apparaissent avec des ruptures partielles au-dessus de 4% d'extension et des lésions complètes au-dessus de 7% [30]. [Annexe 2]

L'objectif de l'étude réalisé par Yong et al., est de quantifier l'activité musculaire chez les coureurs RFS par rapport aux coureurs FFS. Ils vont enregistrer l'activité musculaire de dix muscles et mesurer la force de réaction au sol chez douze coureurs talon et dix coureurs avant-pied. L'analyse cinématique et cinétique ainsi que l'enregistrement de l'activité musculaire sont effectués sur tapis de course. Après un échauffement libre, les sujets courent pendant un minimum de trois minutes à 4m/s. Les résultats des analyses cinématiques et cinétiques indiquent une flexion plantaire de cheville en FFS de 11° et une dorsiflexion en RFS de 6°. Lors d'une attaque FFS, la flexion de genou est plus importante que lors d'une attaque RFS. Cette flexion permet de diminuer les contraintes. Les résultats de l'électromyographe montrent qu'au début de la phase portante, aucune différence significative n'est trouvée dans l'activation du tibial antérieur et des fléchisseurs plantaires entre FFS et RFS. Aucune différence d'activation

musculaire n'est relevée pendant la phase oscillante. A la fin de la phase oscillante, on **retrouve une faible activité musculaire du tibia antérieur pour les coureurs FFS par rapport au coureurs RFS** ($p=0,001$). **En revanche une activité musculaire importante est enregistrée pour les gastrocnémiens médial et latéral en attaque FFS** par rapport à la pose de pied talon. Cette activation musculaire importante des gastrocnémiens pourrait exposer les structures à des risques de blessures. Aucune différence significative n'est notée pour l'activité du soléaire entre FFS et RFS [31].

La différence d'activité musculaire entre les coureurs FFS et les RFS permet de mieux expliquer les différents types de blessures.

C. Stecco et al, dans leur étude réalisée en 2013, mettent en avant une **corrélation statistique significative entre l'épaisseur du fascia plantaire et le paratendon**. Ainsi une sur-sollicitation du fascia plantaire notamment lors de la course avant-pied aurait une répercussion directe sur le paratendon du tendon d'Achille. C. Stecco et al ont analysé cinquante-deux IRM de patients présentant des chevilles pathologiques ou des pieds douloureux. Deux groupes sont distingués. Un groupe présentant des signes d'inflammation au niveau du tendon d'Achille et un groupe sans présence de signe inflammatoire. Les épaisseurs du fascia plantaire et du paratendon sont mesurées et regroupées dans des données statistiques. **Ces analyses montrent que le fascia plantaire est étroitement relié au paratendon du tendon d'Achille en regard du périoste du calcaneum. Vingt-sept IRM sur cinquante-deux montrent des signes d'inflammation ou de dégénérescence du tendon d'Achille avec un fascia plantaire épaissi à 3,43mm (+/- 0,48)** Les IRM ne montrant aucun signe d'inflammation ou de dégénérescence du tendon d'Achille présente un fascia plantaire d'une épaisseur de 2,09mm (+/- 0,24). La différence d'épaisseur de 1,29mm (+/-0,57) est statistiquement significative. **La relation entre le fascia plantaire et le tendon d'Achille indique que la structure du triceps sural et du tendon d'Achille peut être lésée dans les pathologies du fascia plantaire** [32]. [Annexe 11]

Pelletier-Galarneau M et al, ont analysé les signes cliniques et les clichés SPECT-CT (Single Photon Emission Computed Tomography – Computed Tomography) des coureurs à pied présentant des blessures de la cheville et du pied. Ils indiquent que le fascia plantaire relie les tissus supportant l'arche du pied et se connecte à la tubérosité du calcaneum jusqu'à la tête des métatarses. Les résultats montrent que la fascite plantaire est associée à un déficit de flexibilité des muscles du mollet et du tendon d'Achille qui participent aussi à soutenir l'arche du pied. Les coureurs FFS augmentent la charge sur le tendon d'Achille, ce qui augmente le risque de blessures. Deux tiers des blessures du tendon d'Achille sont des paratendinites et un cinquième sont des bursites et des tendinopathies d'insertion. Les autres blessures du tendon d'Achille sont des blessures de la jonction-miotendineuse et des tendinoses. Une augmentation de sang est observée à l'insertion du calcaneum pour les tendinopathie d'insertion. L'imagerie permet de localiser les lésions qui affectent le tendon [33].

Dans son article, Millet G. expose en quoi la fatigue neuro-musculaire lors d'un ultra trail, peut expliquer certaines adaptations et stratégies de course et notamment celle de la pose de pied. Il définit la fatigue comme un manque de force, c'est-à-dire une diminution de la contraction volontaire maximale. 70% des athlètes de haut niveau et 85% des débutants prennent appui sur l'arrière-pied lors d'épreuves de longue distance. D'après Millet G, ce fort pourcentage peut s'expliquer en partie par la fatigue musculaire des fléchisseurs plantaires qui ne peuvent

assurer leur travail excentrique sur de longue distance. Les résultats de son étude, sur la fatigue neuro-musculaire lors de l'Ultra-trail du Mont Blanc (166km) et le Tor des Géants (330km), montrent une diminution de la force musculaire des extenseurs des genoux et des fléchisseurs plantaires de 30 à 40%, ce qui engendre une diminution de la force développée sur chaque pas. La fatigue peut être comprise comme un régulateur de performance, comme une stratégie de conservation de l'intégrité des cellules et de leur fonction [34].

L'objectif de l'étude de Liebl D et al était de tester la différence de force des fléchisseurs plantaires entre une attaque avant-pied et une attaque talon. 119 sujets (hommes et femmes) ont participé à cette étude. La force des fléchisseurs plantaires était déterminée par une contraction maximale volontaire (MVC) isométrique avec un dynamomètre. Les sujets sont assis et ils maintiennent la MVC pendant 5'', avec genou fléchi à 90° puis avec genou en extension. Chaque sujet a 3 essais, la meilleure performance est retenue pour les analyses. La course s'effectue à une vitesse de 3,5m/s sur une piste en Tartan de 200m en aller-retour pieds nus et chaussée. Des marqueurs sont placés sur chaque sujet pour l'analyse cinématique. Les résultats de leurs travaux montrent que les coureurs « avant-pied » sont capables de produire un moment articulaire avec des tractions sur le tendon et une contraction maximale volontaire de leurs fléchisseurs plantaires significativement plus important que les coureurs « talon ». La différence est de 0,28Nm/kg. **Les coureurs chaussés qui habituellement courent en avant-pied développent des capacités de force et d'endurance du triceps sural supérieures aux coureurs « arrière-pied »** [35].

L'objectif de l'étude de Yu J. était d'identifier, chez des coureurs avec une tendinopathie d'Achille unilatérale, le changement d'activité musculaire en comparant l'activité des muscles du côté affecté et du côté non-affecté pendant un exercice excentrique et concentrique. Cette étude inclut 18 participants constitués d'hommes et de femmes ayant une tendinopathie d'Achille chronique sur une seule jambe et avec plus d'un an d'expérience de course à pied. Tous les sujets réalisent un exercice concentrique et excentrique en flexion plantaire max et en dorsiflexion maximale pendant 8''. Les résultats sont obtenus par un électromyographe. Ils indiquent que tous les muscles examinés montrent une augmentation significative du pourcentage de la contraction maximale volontaire lors de l'exercice concentrique comparé à l'exercice excentrique. Comparé avec le côté sain, le côté atteint montre une augmentation significative du pourcentage de la contraction maximale volontaire du droit fémoral, du tibial antérieur et du gastrocnémien latéral. Yu J. conclut, en précisant que les coureurs avec une tendinopathie d'Achille, présentent une augmentation de l'activité du gastrocnémien médial lors de l'exercice de performance excentrique [36].

III.1.3. Importance d'une pose de pied antérieure dans l'absorption de l'onde choc et dans la diminution des contraintes. Le pied : rôle d'amortisseur.

Dans cette partie nous verrons l'importance de la réception sur l'avant pied dans l'absorption de l'onde de choc et dans la limitation de l'impact transitoire. Nous analyserons la répercussion de ces contraintes sur le tendon d'Achille.

Dans son article, Manolava constate que les moments articulaires sont très différents selon la pose du pied lors de la course. Pour les coureurs de type RFS, les moments articulaires au niveau des genoux sont les plus forts, alors que pour les coureurs de type FFS, les moments

de force au niveau des chevilles sont les plus importants. Pour résumer, il apparaît que poser l'avant du pied en premier induit un meilleur amorti par le membre inférieur, mais dans ce cas, c'est la cheville qui absorbe la majorité de la force. À l'inverse, en attaque talon, la hanche et le genou sont soumis aux forces d'impact de façon importante.

L'amortissement initial de l'impact se fait par un travail excentrique des muscles fessiers pour la hanche et du quadriceps pour le genou. Dans le cas des attaques avant-pied et médio-pied, le triceps sural contrôle la flexion dorsale de la cheville par un travail excentrique. La déformation de la voûte plantaire participe aussi à l'amortissement de cet impact initial.

D'un point de vue biomécanique, lorsque le coureur prend appui au sol avec l'avant du pied, il sollicite l'arche de la voûte plantaire. Un mécanisme d'amortissement est ainsi mis en place. Les muscles intrinsèques de la voûte plantaire sont mis en tension de façon excentrique, ainsi que les fléchisseurs du pied et le triceps sural. Le tendon d'Achille est l'élément entre ces deux systèmes, il sera alors fortement mis en tension. Lors de la réception avec l'avant-pied, le mouvement de flexion plantaire (appui au niveau de la tête des métatarsiens) à la flexion dorsale (descente du talon), va se faire sous le contrôle excentrique des fléchisseurs plantaires et du tendon d'Achille. Cette mise en tension permet au complexe triceps sural/tendon d'Achille d'emmagasiner et de restituer l'énergie élastique pour l'impulsion.

Lors d'une réception avant-pied, le **moment de la force verticale à l'impact, va être transformé en moment de force de rotation**. Ce mécanisme permet d'**amortir la force de réaction au sol**. En revanche, lors d'une réception talon, le moment de la force verticale à l'impact n'est pas transformé en force de rotation. [37].

L'étude de Shih Y et al, indique que les coureurs habitués à courir en basket peuvent **gagner en absorption de choc en changeant la pose de pied en attaque antérieure**. En effet, lors de la course en réception sur l'avant-pied, **le membre inférieur est plus compliant, il y a une meilleure absorption de choc** que ce soit en course pieds nus ou chaussée. Cette étude précise **que pour une foulée de grande amplitude avec un genou tendu lors d'une attaque avant-pied, la charge du taux du pic d'impact sera supérieure** comparée à une foulée courte avec un genou fléchi. Les coureurs avant-pied ont une **diminution significative du taux de charge**. Ce taux de charge étant considéré comme un facteur important de blessures en course à pied. Les sujets ont tendance à plus se blesser quand ils courent pieds nus en maintenant une attaque talon. Ces différentes modalités de course (pose de pied, longueurs des foulées, chaussage) induisent aussi des modifications en termes de contractions musculaires [29].

Dans son article, Lieberman DE mesure la force de réaction au sol en fonction des différents types de pose de pied. Il montre que le taux et la magnitude du pic d'impact chez les coureurs est un prédicteur de blessures. Il parle d'« **impact relation** ». Lieberman précise que les coureurs avant-pied qu'ils soient chaussés ou pieds nus encourent moins de blessures **causées par la force de pic d'impact car lors d'une prise d'appui avant-pied, l'impact transitoire est inexistant**. Une pose de pied FFS **diminue d'environ 50% le taux de charge lors de la phase d'impact** (lors des 50 premières millisecondes de la phase de contact). Les coureurs utilisent une réception avant-pied ou médio-pied pour se protéger de **l'important et rapide pic d'impact transitoire douloureux lors de la course nus pieds**. **La force de réaction au sol est amortie tout au long de la prise d'appui lors d'une pose de pied FFS avec une petite foulée**. La pose d'appui au sol FFS avec une grande foulée aura une moins bonne absorption du pic d'impact transitoire. La prise d'appui talon (avec ou sans chaussure) engendre un impact transitoire qui

transmet une onde de choc tout au long du squelette. [Annexe 12]. Le port de basket ralentit la propagation de cette onde de choc et réduit sa magnitude d'environ 10%. Le taux moyen de charge lors de la course avant-pied et pieds nus est sept fois moins important que pour les coureurs habitués aux chaussures qui courent avec une réception talon. Cette stratégie diminue la masse effective du corps qui entre en collision avec le sol. **Lors d'une prise d'appui avant-pied la force d'impact est de 0,58 fois le poids du corps ce qui est trois fois moins que les coureurs talons nus pieds qui est de 1,89 et chaussés de 1,74 le poids du corps.** Cette différence résulte de plus de compliance de la cheville pendant l'impact qui est due à plus de flexion plantaire lors de la pose de pied. L'angle, entre le sol et le pied au contact initial, diminue. Le segment tibial est alors davantage aligné avec l'axe vertical. Le genou est davantage fléchi. Le jeu articulaire pied, cheville, genou est en flexion il permet d'amortir, de dissiper l'onde de choc. Cette compliance est expliquée pour 74% par la dorsiflexion de la cheville et la flexion du genou. Cette stratégie biomécanique mise en place afin de limiter l'impact transitoire et qui permet d'absorber l'onde de choc, expose le tendon d'Achille à de forte contrainte. Celui-ci étant tracté par le triceps sural par sa partie charnue proximale et mis en tension par le fascia plantaire au niveau du paratendon par sa partie plus distale comme nous l'avons vu précédemment. Une course pied nu médio-pied ou avant-pied aura donc tendance à limiter les pathologies osseuses. En revanche, elle augmente le risque musculaire et tendineux, d'autant plus si le changement est brutal. Cette étude confirme l'analyse de Shih Y et al, **le pied humain est plus efficace que la chaussure dans le cadre de la gestion de la force de réaction au sol. Une pose de pied avant-pied avec une foulée plus courte aura moins d'amplitude de cheville, un taux de charge plus bas et placera moins de tension sur le triceps sural et le tendon d'Achille [5].**

L'objet de l'étude de Giandolini et al, était d'évaluer les effets de quatre paramètres de courses différents, avec des focus précis, sur le taux de charge lors de la pose de pied, chez des coureurs débutants. Neuf sujets ayant une attaque RFS réalisent cinq essais de cinq minutes de course, pendant lesquelles les données cinétiques et cinématiques sont mesurées sur dix pas consécutifs sur un tapis de course. L'activité électromyographique, du gastrocnémien latéral (GL), du tibial antérieur (TA), du biceps fémoral et du vaste médial est enregistrée sur les différentes phases du cycle de course. Les sujets courent en fonction des quatre paramètres suivants : Avec des baskets, en augmentant la fréquence des pas de 10%, en adoptant une pose de pied MFS et en combinant les trois interventions. Le niveau de preuve est significatif pour $p < 0,005$. Les résultats montrent que le taux de charge, est significativement réduit chez le coureur MFS ($37.4 \pm 7.20 \text{ BW s}^{-1}$, $-56.9 \pm 50.0 \%$) et lors de l'intervention des trois paramètres combinés ($36.8 \pm 7.15 \text{ BW s}^{-1}$, $-55.6 \pm 29.2 \%$). Conditions comparées par rapport à la norme ($56.3 \pm 11.5 \text{ BW s}^{-1}$, both $P < 0.001$). En revanche, il n'y a pas d'effet significatif sur le taux de charge, entre les conditions de courses chaussées et lors de l'augmentation de la fréquence des pas de 10%. Aussi, l'activité musculaire enregistrée par l'EMG lors de la course en MFS montre une augmentation significativement de la pré-activation musculaire du gastrocnémien latéral ($208 \pm 97.4 \%$, $P < 0.05$) et une diminution significative de celle du tibial antérieur. Ainsi, d'après ces résultats, **la solution la plus efficace pour réduire le taux de charge lors de l'impact est le pattern MFS (*-57 %, 95 % CI: -58.0 to 55.9) comparé à la combinaison des trois conditions testées (*-56 %, 95 % CI: -56.2 to 54.9), qui ont des effets similaires mais une quantité d'intervention supérieure lorsqu'il faut combiner les trois conditions. Cependant en pratique il est plus aisé d'intégrer une modification de la cadence de la foulée et de sa longueur afin**

d'influencer la pose de pied qui est plus complexe à stabiliser dans le temps. De façon concomitante à ses changements de pose de pied, les résultats ont enregistré une plus haute activité du GL et une activité plus basse du TA pendant la phase de pré-activation. La réduction du taux de charge observée avec ce pattern de course peut être associée à une diminution du risque de blessures associées et plus spécialement les blessures ostéo-articulaires, dont les fractures de stress tibial. Cependant cette pose de pied peut engendrer des blessures collatérales, notamment des blessures de stress des métatarses, des périostites tibiales et des tendinopathies d'Achille si une prise en charge progressive n'est pas conduite [38].

Dans son étude réalisée en 2013, Kulmala JP et al se sont intéressés à la charge impliquée sur les genoux et les chevilles lors d'une pose de pieds RFS et FFS. Après sélection de 286 athlètes de club, 38 femmes sont retenues pour l'étude. 19 présentent une pose de pied FFS non variable en fonction des conditions de course. Le critère retenu pour déterminer la pose de pied FFS était le calcul de l'angle de pose de pied qui devait être inférieur à 8° (foot strike angle : FSA). Et 19 femmes courent en RFS, avec un angle de pose de pied FSA supérieur à 8° . Cet angle est calculé par une analyse vidéo en 3D. Une analyse de course est effectuée. Les données anthropométriques sont mesurées et 34 marqueurs sont placés sur le sujet (de la tête au pied). Les sujets courent à 4m/s sur une piste de 15m. Une plate forme de force enregistre la force de réaction au sol. Une analyse cinématique et cinétique mesure les angles articulaires et les moments de forces. La pose du pied et le moment où les orteils quittent le sol sont utilisés pour calculer la cadence et la longueur des foulées. L'analyse statistique des données cinématique et cinétique évalue le taux de charge et la magnitude de la force de réaction au sol au niveau des articulations du genou et de la cheville. Les résultats montrent un moment de flexion plantaire ($3,12 \pm 0,40$ contre $2,54 \pm 0,37$ Nm/kg ; $P=0,001$) et une force exercée sur le tendon d'Achille (6.3 ± 0.8 vs 5.1 ± 1.3 body weight ; $P = 0.002$) plus importante lors d'une course FFS que lors d'une course RFS. **Les coureurs FFS ont une flexion plantaire de cheville plus importante et une charge sur le tendon d'Achille qui est augmentée ce qui permet une meilleure absorption des contraintes mais cela augmente le risque de tendinopathie d'Achille [39].**

Y a-t-il un modèle de course plus efficient pour notre santé. Est-ce que la réception par le talon serait le modèle le plus protecteur pour nos tendons d'Achille lors de la course à pied en trail?

III.2. Influence d'une pose de pied arrière pied (RFS) sur la survenue des tendinopathies d'Achille

Dans cette partie nous allons étudier l'influence de la pose du talon en premier au sol sur la survenue des tendinopathies d'Achille. Daoud et al ont analysé, dans leur étude réalisée en 2012, l'incidence de la pose de pied sur la survenue des blessures. Ils ont mis en relation le taux de blessures avec le type de pose du pied au sol. 52 athlètes (29 hommes et 23 femmes), de l'Université d'Harvard, de l'équipe de cross country ont été sollicités pour cette étude qui a duré cinq ans. Les informations concernant les entraînements étaient relevées quotidiennement sur un site web. La pose de pied a été difficile à évaluer car elle variait en fonction du type de course, de l'entraînement mais aussi de la fatigue et de la vitesse. Tous les athlètes reportaient leurs

blessures après consultation auprès du même thérapeute. Les analyses statistiques ont été classées selon quatre variables en fonction du taux de blessures répétitives, du taux de blessures traumatiques et du taux de blessures prédictives d'une pose de pied FFS ou RFS. Sur les 52 athlètes, les résultats indiquent 69% de coureurs RFS et 31% de coureurs FFS. Ces résultats montrent que les coureurs de type RFS présentent deux fois plus de blessures de types répétitives que les coureurs de type FFS. Cependant, aucune différence significative n'est notée entre ces deux types de coureurs au sujet des blessures traumatiques. Les données statistiques indiquent que le taux de blessures augmente lors d'une **pose de pied talon**, si l'athlète est une femme, si les distances parcourues sont longues et si l'indice de masse corporelle est grand [24]. D'après cette étude l'attaque talon augmente le taux de blessures. Qu'elles en sont les raisons et qu'en est-il pour les tendinopathies d'Achille ?

III.2.1. L'attaque talon : incidence de la chaussure sur la pose de pied et répercussions biomécaniques.

La chaussure de running est de plus en plus technique avec en fonction des marques plus de légèreté, plus d'amorti, plus de drop, plus de confort, plus de stabilité... pour de meilleures performances et moins de blessures ?

L'étude de Lieberman DE et al., menée sur 5 groupes de coureurs, compare la cinématique de la pose de pied des coureurs d'endurance en fonction de leur passé sportif (coureurs habituellement chaussés ou coureurs pieds nus). Le test est effectué sur une piste indoor de 20m de long avec une plate forme de force afin d'enregistrer la force verticale de réaction au sol. Les résultats montrent que les poses de pied sont variables en fonction des sujets et des groupes. **Les coureurs habitués à porter des chaussures sont pour la majorité des coureurs ayant une attaque talon. L'attaque talon est facilitée par les chaussures avec un drop important.** Les coureurs conservent l'attaque talon même quand ils courent nu pieds sur une surface dure. Cependant ils adaptent leur placement de pied avec une dorsiflexion de 7 à 10° en moins. Lieberman précise que **quelques millimètres de matériaux absorbants suffisent à modifier notre pose de pied en passant d'une réception sur l'avant-pied à une réception talon.** Un homme habitué à courir pieds nus avec une foulée FFS peut devenir RFS lorsqu'il met des chaussures de running. Les chaussures avec un support d'arche et une semelle rigide **génèrent une faiblesse des muscles du pied et diminuent la force de l'arche.** De plus bien qu'ils soient confortables, l'amorti et le talon surélevé des chaussures, limitent la proprioception **au niveau du pied.** L'amorti ralentit le taux de charge, ralentit la propagation de la magnitude. En diminuant la sensation de choc l'amorti de la chaussure est un trompeur proprioceptif. Or le pic d'impact transitoire est présent avec ou sans chaussure lors d'une attaque talon. Le système de compensation de la charge s'avère alors moins performant. En attaque talon et pour des coureurs avec des chaussures à talon surélevé, **l'arche plantaire n'est pas mise en tension contrairement à l'attaque avant pied ou l'arche longitudinale du pied est en charge dans les trois plans [21].** [Annexe 13]

L'étude de Shih Y et al., est réalisée sur une population de 12 hommes habitués à courir avec des chaussures. Une analyse cinématique (mesures des angles articulaires), cinétique (mesure de la force verticale de réaction au sol, du taux de charge, de la raideur de l'extrémité

inferieur, du temps de vol et de la cadence) et électromyographique (mesure de l'activité musculaire des muscles : droit fémoral, tibial antérieur, biceps fémoral, et gastrocémien) est effectuée sur tapis de course dans quatre conditions différentes: course pieds nus attaque avant-pied, course pieds nus attaque talon, course chaussée attaque avant-pied et course chaussée attaque talon. [Annexe7]. L'analyse cinématique est conduite dans un laboratoire utilisant 10 caméras pour une analyse en trois dimensions. 39 marqueurs sont placés sur chaque participant pour calculer les angles de la hanche, du genou, de la flexion plantaire et de la dorsiflexion de la cheville et du pied. Les analyses cinétiques et cinématiques sont évaluées dans les quatre conditions lors d'une minute de course. Les coureurs ont deux minutes de repos entre chaque intervalle de course. Avant de commencer les quatre expérimentations de course, les participants s'échauffent en courant sur l'avant-pied. Les données cinématiques et cinétiques sont enregistrées pour chaque participant. Les caméras enregistrent et reportent les types de pose de pied sur un logiciel. Tous les coureurs portent le même modèle de basket. Les résultats de cette étude indiquent que d'un point de vue cinétique et cinématique la **pose du pied joue un rôle plus important que les conditions de chaussage sur l'influence de ces paramètres. La réception avant pied permettra d'obtenir une meilleure absorption de choc aux coureurs habitués à courir en basket.** Ces coureurs se blesseront plus facilement en courant pieds nus et en continuant à utiliser une réception talon. L'extrémité du membre inférieur peut gagner plus en compliance avec une pose de pied FFS. Une différence significative de la cadence est calculée entre les conditions de course chaussée et nus pieds quelque soit la pose de pied. Avec une cadence qui augmente en condition nus pieds. L'analyse cinématique montre que les coureurs adoptant une FFS ont une réduction significative du taux de charge, lequel est considéré comme un facteur important de blessures de course à pied. Le taux de charge en FFS ne montre pas de différence significative entre les différentes conditions de chaussage (barefoot ou chaussé) [30].

Dans son étude, Lieberman DE, montre que la transition chaussure vers barefoot entraine fréquemment des blessures au tendon d'Achille et des contraintes sur les muscles du mollet. Cela reflète l'augmentation de l'activité des fléchisseurs plantaires appliqués à la cheville pendant la course pose de pied FFS. Lieberman se pose alors les questions suivantes : Quelle transition pour éviter les blessures ? Courir en barefoot ou chaussé pour limiter les blessures ? Ce qui est le facteur de risque ce n'est pas la chaussure mais la façon dont on court. Si on court en barefoot avec peu de technique de pied cela occasionne des blessures. La transition chaussures vers barefoot occasionne des blessures si le changement se fait trop rapidement et sans préparation du système neuro-musculaire pour s'adapter à la différence de force que ce genre de course à pied génère sur le système musculo-squelettique. Le changement trop radical et rapide de chaussures pour des minimalistes peut induire une baisse du stress ostéo-articulaire mais augmenter conjointement la contrainte mécanique subie par les muscles du mollet et par le tendon d'Achille. Il y a un changement « d'amortisseur », en sollicitant moins les tissus durs : os cartilage mais en sollicitant davantage les tissus mous : tendons, muscles. **Entre 20 et 70% des coureurs chaussés évitent la blessure parce qu'ils ont une bonne attitude de course. « Ce n'est pas la chaussure mais la façon dont on court qui limitent les blessures »** [5].

Dubois B. résume les effets de l'incidence de la chaussure en indiquant qu'elle **change la biomécanique naturelle de la foulée et ralentit la cadence.** L'absorption dans la chaussure augmente « le stress » sur le squelette ou ne le diminue pas, et diminue le stress sur le pied. L'absorption intégrée dans la chaussure ne diminue pas l'incidence des blessures La chaussure fragilise les tissus du pied, affaiblit la musculature, affaisse les arches (le minimaliste quant à lui,

augmente la force et le volume musculaire). Un transfert trop rapide vers le minimalisme va augmenter l'incidence des blessures [6].

III.2.2. Les caractéristiques physiques et mécaniques du tendon d'Achille en fonction de la pose de pied du trailer.

K Kubo et al., dans leur étude réalisée en 2015 sur 41 hommes de haut niveau sur des épreuves de longues distances (entraînement hebdomadaire : entre 150 et 200km par semaine), s'intéressent aux caractéristiques physiques du tendon d'Achille. Lors de cette étude les propriétés élastiques ainsi que la raideur du tendon d'Achille sont mesurées sur trois groupes de coureurs (12 coureurs avant pied, 12 coureurs médio pied et 17 coureurs arrière pied). **Les résultats montrent que les différents modèles d'attaque de pied (avant, arrière ou médio pied) n'affectent pas les propriétés du tendon d'Achille** : propriétés mécaniques, élastiques, et morphologiques. Kubo et al ne trouvent aucune différence significative sur les caractéristiques physiques (largeur, élongation et raideur) du tendon d'Achille entre les trois groupes. Cependant, le tendon des coureurs de longue distance est moins extensible que ceux des sujets non entraînés [40].

L'étude de Almonroeder T et al est réalisée sur une population de 19 femmes. Le propos de cette étude était d'estimer la charge du tendon d'Achille sur une population de coureuses au début de leur transition en course pieds nus avec une attaque talon ou non (NRFS). L'étude est réalisée sur un tapis de course de 20m. Les participantes ont deux passages à deux vitesses différentes : 3,52 et 3,89m/s au cours desquels la force des gastrocnémiens et du soléaire est enregistrée. L'analyse cinétique et cinématique est réalisée avec une caméra vidéo en 3D. La force de réaction au sol est mesurée sur une plate forme de force par des capteurs en conditions de course. Les participantes courent pieds nus ou en minimaliste en choisissant leur propre style de pose de pied. L'enregistrement est effectué sur un minimum de 125 pas et sur un maximum de 10'. Les résultats de cette étude montrent que 11 participantes sur 19 ont choisi l'attaque talon en course pieds nus (58%). **Le gastrocnémien médial et le soléaire produisent la majeure partie de la force pour chaque pas quelque soit la pose de pied.** Les différents modèles de pose de pied pendant la course affectent le taux de charge et les blessures potentielles du tendon d'Achille. La course pieds nus avec une attaque non talon (NRFS) augmente la tension du tendon d'Achille de 24% pour chaque pas comparé à la course attaque talon (RFS). **Le pic de force du tendon d'Achille apparaît tôt dans la phase de pose de pied ($P=0,007$) ce qui contribue à augmenter de 15% la moyenne de vitesse de charge du tendon d'Achille pour les participantes adoptant une pose de pied NRFS. ($P=0,06$).** Ils mettent en avant que le temps d'appui, la longueur des foulées et le nombre de foulées par miles est similaire entre les groupes. Cependant **les coureuses avec une pose de pied NRFS ont un taux de charge du tendon d'Achille supérieur de 11% ($P=0,05$).** Cette différence correspond à additionner 47,7 fois le poids du corps pour chaque mile avec une pose de pied NRFS. Almonroeder et al précisent que les femmes avec une **attaque non talon ont quatre fois plus de plaintes de tendinopathie d'Achille que les femmes avec une attaque talon.** Cela suggère que l'attaque avant pied augmente la charge sur le tendon d'Achille et les proportions de tendinopathie [2].

III.2.3. L'incidence de la pose de pied par le talon : création d'un pic d'impact transitoire

Dans son ouvrage, F. Brigaud [19], propose un test simple afin de ressentir la propagation de l'onde de choc dans le corps. Le test consiste à sauter à pieds joints sur les talons cinq fois puis sur les pointes de pieds cinq fois. (Test effectué pieds nus puis en basket). Après avoir réalisé ce test vous prenez conscience de la forte propagation de l'onde de choc dans le corps en condition pieds nus sur talon. Par contre, en condition pieds nus sur avant pied, l'onde de choc est neutralisée par le système d'amortissement de la voûte plantaire et du tendon d'Achille. Avec les chaussures, la semelle joue le rôle d'amortisseur : on a alors tendance à se mettre sur les talons. Est-ce la bonne solution ?

La course à pied engendre une force de réaction du sol sur le pied pouvant dépasser le triple du poids du corps. Chaque appui au sol en sur sollicitant une structure tendineuse, osseuse ou articulaire peut-être à l'origine d'une pathologie liée à la course à pied [13]. Lors de la prise d'appui au sol, le coureur va devoir gérer la force de réaction, sous peine de subir l'onde de choc. Si la force de réaction au sol n'est pas amortie, l'onde de choc va se diffuser de manière rapide au travers des différentes articulations du coureur, de ses pieds jusqu'à la tête.

Nous avons vu dans la partie précédente que les coureurs de type FFS et MFS ont lors de la réception au sol un pic d'impact transitoire quasi inexistant. Il n'en est pas de même chez le coureur attaquant le sol par le talon ou **l'on mesure un pic de force qui se distingue très nettement**. Les résultats des études de Lieberman et al. indiquent qu'il y a **une différence significative dans la force de réaction au sol à l'impact initial entre l'attaque talon et l'attaque avant-pied ou médio-pied**. [Annexe 14] La force de réaction au sol, mesurée sur une plate forme de force lors de l'impact transitoire pour un coureur qui attaque par le talon nus pieds à 4m/s est de 400 à 600 fois le poids du corps par seconde et la magnitude de ce pic est comprise entre 1,5 et 2,5 fois le poids du corps. L'impact ainsi créé envoie une onde de choc mesurée dans le tibia après quelques milliseconde et cette onde de choc est enregistrée au niveau de la tête 10 millisecondes plus tard. L'élévation et l'amorti des chaussures modernes limitent la magnitude du pic d'impact transitoire causé par l'attaque talon d'environ 10% et ralentissent le taux de charge de 70 à 100 fois le poids du corps par seconde. L'attaque talon sur une surface dure apparaît alors plus confortable dans une chaussure moderne mais la chaussure n'élimine pas le pic d'impact transitoire de la force de réaction au sol. Ainsi, **l'attaque talon génère une force de collision de 1,5 à 3 fois le poids du corps dans les 50 premières millisecondes, une décélération soudaine de la masse du corps et un impact transitoire associé. De fortes amplitudes de charge qui traversent rapidement le corps sont enregistrées et contribuent ainsi à la haute incidence des blessures associées à la course à pied** et plus particulièrement les fractures de stress tibial et de syndrome fémoro patellaire mais limite le risque de tendinopathie d'Achille [21].

Dans leur article, Divert et al ont analysé la propagation de l'onde de choc entre les coureurs pieds nus et les coureurs chaussés. Ils ont mesuré les paramètres cinétiques sur 35 sujets (31 hommes et 4 femmes) qui couraient deux séries de quatre minutes à 3,33m/s sur un tapis de course dans un ordre randomisé utilisant une course avec réception talon. La première série est courue pieds nus et la deuxième série est courue chaussée. L'amplitude de la force verticale des pics passifs et actifs, l'impulsion verticale, le temps d'appui et d'envol et la longueur des foulées ont été mesurés sur un tapis de course muni d'un dynamomètre. L'activité musculaire du tibial

antérieur, des fibulaires, des gastrocnémiens, et du soléaire a été enregistrée. Tous ces paramètres ont été mesurés sur soixante pas consécutifs. L'analyse des résultats distingue deux pics. Un pic passif, retrouvé exclusivement chez les coureur RFS, et un pic actif présent chez les deux types de pose de pied. Ils parlent de pic « passif », précoce correspondant au moment de l'appui talon. Le second pic est dit « actif » impliquant davantage le rôle amortissant des structures myo-tendineuses du membre inférieur. Les résultats montrent une différence significative entre les conditions chaussées et nus pieds. **Les coureurs pieds nus ont un temps de contact et un temps de vol inférieur ($P < 0,05$), un pic passif de la force de réaction au sol plus faible (1,48 contre 1,70 du poids du corps, $P < 0,05$) et une pré-activation plus importante du triceps sural ($P < 0,05$) comparé aux coureurs chaussés. L'amplitude de la force d'impact au sol et son taux de développement sont significativement supérieurs chez les coureurs de type talons, chaussés ou pieds nus.** Cette force d'impact, bien que réduite par un amortissement artificiel, a un impact sur les structures musculo-squelettiques. La répétition de ces impacts induit différentes blessures au niveau des membres inférieurs. Le coureur nu pieds s'organise pour diminuer le pic d'impact afin de réduire le stress mécanique procuré pendant les pas répétitifs [41]. [Annexe15]

Manalova confirme ces résultats en indiquant que l'attaque talon implique une flexion dorsale de cheville et son point d'impact se fait à la verticale de son axe. Son implication initiale dans le mécanisme d'amortissement est donc réduite. En « shuntant » le travail d'amortissement du pied et de la cheville, l'attaque talon aboutit à une implication plus importante des articulations sus-jacentes dans le mécanisme d'amortissement. Les structures myo-tendineuses au niveau des articulations du pied et de la cheville sont alors moins sollicitées. La préparation à l'impact et le contrôle de la vitesse de la force de réaction au sol sont analysées avec un électromyogramme. Les résultats montrent que lors d'une attaque FFS il y a une pré-activation musculaire des fléchisseurs plantaires. Cette activité musculaire juste avant l'impact permet de préparer les structures aux contraintes excentriques exercées lors de l'appui avant pied afin de protéger le squelette des traumatismes occasionnés par les chocs répétés. Cette pré-activation est moindre lors d'une attaque talon [37].

IV. Discussion

L'objectif de cette revue de littérature était d'identifier les preuves scientifiques, susceptibles de légitimer la place du MKDE dans la prévention et la récurrence des tendinopathies d'Achille chez le traileur. La sur-sollicitation étant la cause principale de survenue de ces troubles, j'ai abordé ce mémoire en réfléchissant aux conditions de pose de pied pouvant limiter cette sur-sollicitation afin de prévenir l'apparition de ce traumatisme trop présent et récurrent chez le coureur à pied.

Nous avons analysé dans ce mémoire la relation entre la pose de pied et les blessures au niveau du tendon d'Achille. Les études confirment notre hypothèse de départ. Le tendon d'Achille est sollicité différemment en fonction de la pose de pied. Les coureurs de type FFS présenteront plus de pathologies myo-tendineuses dues aux contraintes exercées au niveau du tendon d'Achille par la sollicitation accrue du triceps sural et du fascia plantaire. Les coureurs de type RFS, présenteront quant à eux, plus de « pathologies osseuses » dues à la force d'impact au sol. Cette force d'impact étant significativement corrélée avec cette pose de pied.

Concernant la confrontation des résultats. Intérêts MKDE:

Après analyse de ces résultats nous sommes en mesure de donner des éléments de réponses concernant la pose de pied que pourra conseiller le MKDE à ses patients trailers afin de préserver le tendon d'Achille et limiter les récides de tendinopathies.

Tout d'abord nous avons vu qu'une attaque FFS induit une pose de pied sous le centre de gravité, avec une légère flexion de hanche et de genou, la cheville est en flexion plantaire, le tibia est vertical, avec une répartition du poids majoritairement sur la partie la plus large du pied. Cette organisation, en rendant le système plus compliant, limite le pic d'impact transitoire initial (quasi inexistant) et permet une meilleure absorption de l'onde de choc. Cette pose de pied réduit ainsi les contraintes ostéo-articulaires appliquées sur les hanches, les genoux et le dos. Cependant, « cette chaîne de flexion » qui a la particularité d'amortir les contraintes et de dissiper l'onde de choc, serait plus contraignante pour les structures tendineuses et musculaires. En effet, le mouvement de la flexion plantaire à la flexion dorsale lors de la prise d'appui avant-pied, va se faire sous le contrôle des muscles du mollet et du tendon d'Achille. Cette biomécanique expose le tendon d'Achille à une double contrainte étant l'élément entre le triceps sural et le fascia plantaire. Le tendon d'Achille sera aussi l'élément clé permettant d'emmagasiner et de restituer l'énergie élastique. Les contraintes appliquées au tendon d'Achille, pouvant ainsi aller de 1 à 15 %. Cette sur-sollicitation peut engendrer une hausse du risque de tendinopathies achilléennes chez les personnes adoptant cette technique de pose de pied. Cependant, aucune étude ne montre un nombre de tendinopathies plus importantes chez les coureurs FFS. Dès lors que l'on a acquis la pose de pied FFS, s'il n'y a pas de sur-sollicitation des structures, nous rencontrons peu ou pas de risque de blessures musculo-tendineuses.

Chaque technique de pose de pied présente des spécificités cinématiques conduisant à des intensités et des localisations de contraintes musculo-squelettiques différentes. Lors d'une attaque du sol par le talon, le pied se pose sur le calcaneum, en avant du centre de gravité, la hanche est fléchiée et le genou est tendu, la cheville est en flexion dorsale, avec une pose du talon en avant. Il se réalisera donc une flexion plantaire passive tout au long de l'appui jusqu'à l'impulsion. Il s'agit d'une « chaîne d'extension » sans amortissement des contraintes et avec un important pic d'impact transitoire ou pic passif qui est quasi inexistant lors de la course en FFS. On trouvera chez ce type de coureur plus de pathologies osseuses dues à la force d'impact au sol et à la propagation de l'onde de choc. Ce pattern de course représente 80% des coureurs.

Afin de répondre au mieux aux caractéristiques de chacun de ses patients le MKDE sera vigilant à ne pas stéréotyper ni généraliser ses conseils. Ils seront à adapter en fonction du niveau de pratique du coureur, de ses antécédents de blessures, de ses motivations (compétition, performance ou loisir), de sa morphologie (tendon fort et articulations fragiles ou l'inverse), mais aussi du terrain, du dénivelé et de la distance parcourue.

Ainsi, un coureur débutant sans antécédent de pathologies musculo-tendineuses des extrémités des membres inférieurs sera orienté vers une technique de pose de pied FFS afin de limiter les traumatismes ostéo-articulaires dues à la force d'impact au sol et à la propagation de l'onde de choc (meilleur comportement « de modération d'impact »). Un travail actif des fléchisseurs plantaires ainsi qu'un renforcement des muscles intrinsèques du pied et un travail de proprioception et d'étirement de la chaîne postérieure seront proposés en parallèle à la course à pied afin de préparer le système musculo-tendineux aux futures contraintes qui s'exerceront lors de la course à pied. L'entraînement adapté des gastrocnémiens permet un parfait système d'amortissement pour le coureur lui-même. Cependant un entraînement excessif en contraction excentrique pourrait occasionner des tendinopathies d'Achille.

Au cabinet du Sport du lac d'Annecy, lors de mon stage, j'ai pu prendre en charge un trilater confirmé qui présentait des récives de tendinopathies d'Achille bilatérales. Je l'ai longuement questionné sur sa pratique, ses antécédents et sur les facteurs de risques intrinsèques et extrinsèques inhérents à sa pathologie, afin de comprendre les causes de ses troubles récurrentes. Ainsi, et afin de ne pas sur-solliciter cette zone de faiblesse, lorsque le délai de cicatrisation lui permettra de reprendre la course, j'ai orienté ce patient dans un premier temps vers une foulée avec une pose de pied plutôt RFS et des baskets avec un léger drop pour soulager le tendon d'Achille.

Cependant en pratique on constate que ces conseils s'avèrent peu pertinents. En effet il a été constaté que si le trilater réfléchit à sa pose de pied il ne le fera que sur quelques minutes et de façon non naturelle. Cette pose de pied ne pourra donc pas se pérenniser et devenir un pattern de course automatisé. Ainsi nos conseils ne porteront pas forcément sur leur pose de pied mais sur d'autres paramètres tels que la cadence, la longueur des foulées et le bruit lors de l'impact du pied au sol. J'ai pu constater l'incidence de ces conseils sur l'influence de la pose de pied, au cabinet de podologie de Chamonix où j'ai effectué un stage d'observation avec un podologue posturologue spécialisé dans le trail. Si l'on souhaite que notre patient adopte une pose de pied FFS afin de limiter les contraintes ostéo-articulaires en sollicitant son système de façon plus compliant, nous l'orienterons vers une réduction de la longueur de sa foulée, vers plus de fréquence et vers moins de bruit à la pose de pied. Ces indications l'amèneront vers un système de sollicitations musculo-squelettiques, plus dynamique, plus compliant et avec une pose de pied FFS.

En condition de trail, le dénivelé et la fatigue musculaire modifient la pose de pied. (Cf l'étude avec K. Jornet qui met bien cette notion en avant). Il s'agit d'un exemple parlant, K. Jornet étant l'un des meilleurs coureurs de trail au monde. Lors du dénivelé positif, naturellement le trilater va adopter une pose de pied avant-pied ce qui mettra en tension le tendon d'Achille et la voûte plantaire. La fatigue musculaire quant à elle incite à une pose de pied talon. Cette fatigue musculaire et neuromusculaire renvoie à un mécanisme de protection de l'organisme mise en place dans les parties avec moins de dénivelé pour éviter les dommages musculaires et préserver le tendon d'Achille extrêmement sollicité lors des montées.

Nous avons vu aussi, que le choix de chaussures influençait la pose de pied, la foulée et les blessures associées. Ainsi afin de limiter les contraintes qui s'exercent sur le tendon d'Achille, les chaussures avec un léger drop qui favorisent une attaque par le talon pourront être une alternative à la récive ou à la chronicité de nos patients trailers lors de la reprise sportive progressive. Inversement, la course pieds nus (ou avec des chaussures minimalistes qui n'ont que très peu de drop) orientera naturellement le trilater vers une foulée avec une attaque avant-pied.

Connaître la technique de pose de pied du coureur et sa sensibilité face aux blessures musculo-squelettiques s'avèrent nécessaire dans le choix de la chaussure portée. L'identification de la pose de pied chez nos patients en condition de course permet d'améliorer la compréhension du mécanisme d'apparition des blessures, afin de traiter la cause et prévenir efficacement les récives.

Cependant, changer radicalement de pose de pied et/ou de chaussures entraîne une modification dans l'intensité et dans la localisation des contraintes appliquées au système musculo-squelettique du coureur. La progressivité de la transition sera déterminante afin de ne pas contraindre de façon trop rapide et trop importante les structures ostéo-articulaires. **L'alternance des poses de pied, pourrait aussi être une solution dans la prévention et la diminution des récives, dans le sens où cela permet de solliciter moins intensément**

différentes structures plutôt que d'appliquer continuellement un stress répété sur les mêmes éléments. La pratique du trail incite plus naturellement à cette alternance.

Nous serons alors particulièrement vigilants à la transition d'un type de pose du pied à un autre. Surtout qu'aucune étude n'a encore montré si le fait de passer de RFS à FFS diminuait le taux de blessures. La transition sur l'avant-pied, pieds nus ou avec des chaussures minimalistes est une tendance très actuelle et nécessite un temps d'adaptation. Un coureur qui ne serait pas habitué à ce type de pose de pied pourrait éventuellement souffrir de tendinopathies au niveau du tendon d'Achille, plus fortement sollicité, et de diverses douleurs au niveau du pied et du mollet. Il est donc très important de changer le style de course de manière très progressive en termes de temps, de durée et d'intensité. **Le schéma de course développé par le trailer correspond à une organisation qui lui est propre et qui répond le plus souvent à une adaptation à ses antécédents pathologiques, mais aussi à ses rétractions musculaires, ainsi qu'à ses contraintes ostéo-articulaires et musculo-tendineuses dans le but d'être le plus économique possible.** Modifier sa foulée, sa pose de pied et le drop trop brutalement pourrait occasionner des blessures. Cependant, le coureur de trail, contrairement aux coureurs sur route, aura une foulée et une pose de pied qui s'adaptera aux terrains. Ainsi le stress appliqué sur les structures ostéo-articulaires et musculo-tendineuses, sera moins intense dans le sens où il ne s'appliquera pas de façon identique, répétitive et continue mais, au contraire, la foulée et la pose de pied s'adapteront en permanence aux contraintes du relief, du dénivelé et de la nature du sol.

Faisons maintenant le point sur les aspects négatifs et positifs :

- Les limites :

La majorité des articles exploités se sont appuyés sur des études réalisées sur tapis de course. Or mon mémoire traite la pose de pied chez le trailer. Pose de pied spécifique en terrain varié et naturel qui se dégrade en fonction de la fatigue et qui évolue en fonction du dénivelé. Je n'ai trouvé qu'une étude « in-situ » analysant la pose de pied spécifiquement chez le trailer, l'étude des paramètres cinématiques et cinétiques étant complexe à analyser en milieu naturel. En revanche d'autres études m'ont permis d'aborder la spécificité du trail, notamment la répercussion neuro-musculaire de la fatigue chez les Ultra trailer et les blessures associées à ce type de pratique.

Les résultats des études testant la pose de pied en fonction des baskets peuvent-être biaisés du fait qu'il n'y a pas une paire de basket standard mais une multitude de types de chaussures avec des drops, des systèmes d'amortis et de contrôle du pied différents qui peuvent influencer cette pose de pied. Même si quelques études ont prouvé que malgré le port de basket les coureurs habitués à leur pattern de course conservaient ce même pattern.

La charge d'entraînement constitue un facteur de risque des tendinopathies d'Achille. Or il est souvent indiqué dans les études un nombre de kilomètres hebdomadaires inférieur chez les coureurs minimalistes avant-pied que chez les coureurs chaussés. Cette différence de charge d'entraînement est un élément qui peut aussi biaiser les résultats.

Dans mon analyse, j'ai décidé de faire la distinction entre les coureurs attaquant le sol par le talon de ceux attaquant le sol par l'avant ou le médio-pied sans distinction entre une pose avant-pied et une pose médio-pied, peu d'articles faisant la distinction entre ces deux types de pose de pied. Cette réception étant d'autant plus complexe à différencier lors de la pratique du trail.

Concernant la pertinence de mes articles, je n'ai aucun article réalisé en double aveugle, et peu d'articles sont randomisés. De plus quelques études sont réalisées avec un nombre trop

restreint de sujets (moins de 20 participants) et sollicitant une population exclusivement féminines ou exclusivement masculines.

J'aurais souhaité différencier les tendinopathies en terme de bursite, enthésopathie, paraténonite, ce qui n'a pas été le cas.

Je n'ai pas pu exploiter dans ce mémoire le questionnaire que j'ai fait passer aux patients du cabinet d'Annecy et aux trailers de mon association de Dijon.

- Les aspects positifs :

La majorité de mes articles s'appuie sur des données actuelles. L'utilisation d'études internationales, avec cohorte importante, ainsi que l'inclusion d'individus féminins et masculins dans de nombreux articles exploités font partie des points positifs de ce mémoire.

Malgré le temps important que ce travail demande et la difficulté que j'ai eu à traduire la quasi totalité de mes articles qui étaient en anglais, j'ai pris beaucoup de plaisir à réaliser ce mémoire. Ce sujet m'a donné l'occasion de faire de belles rencontres et il m'a permis d'approfondir un thème dans un domaine qui me passionne.

Conclusion

Il n'y a pas une solution idéale dans la pose de pied. Il va s'agir d'adapter sa foulée en fonction de ses antécédents ou de ses fragilités. Courir en avant-pied ou médio-pied, si le coureur n'est pas habitué à ce type de réception, peut sur-solliciter les fléchisseurs plantaires notamment les gastrocnémiens, ce qui majore le risque de tendinopathie d'Achille. En revanche courir en attaque talon augmente le temps de contact au sol et l'amplitude de l'onde de choc, ce qui élève le risque de traumatisme ostéo-articulaire. Expliquer ce mécanisme à nos patients trailers afin d'améliorer la compréhension de la survenue des tendinopathies d'Achille permettrait de prévenir les récives. La pose du pied va aussi être largement dépendante, du terrain et surtout du dénivelé, qui est une spécificité du trail. Lors des montées, le trailer sera sur pointe de pied et sollicitera largement sa voûte plantaire et son triceps sural. Son tendon d'Achille sera alors fortement mis en contrainte. Afin de prévenir les récives et de limiter l'apparition des tendinopathies d'Achille, je préconiserais malgré, tout d'aller progressivement vers une pose de pied médio-pied ou avant-pied, qui me semble être adaptée à la course en trail et qui limite l'impact au sol et la propagation de l'onde de choc, en permettant aux membres inférieurs de jouer leur rôle d'amortisseur du pied jusqu'à la hanche. Avec la fatigue, cette pose de pied va tendre vers une attaque au sol talon. Elle est donc largement conditionnée par des mécanismes indépendants de notre volonté. Réduire les longueurs de nos foulées, augmenter la cadence et faire moins de bruit vont nous permettre d'aborder le sol de façon plus économique pour notre système ostéo-articulaire. Ainsi une bonne gestion et un bon dosage de l'entraînement, un travail de renforcement musculaire spécifique du pied et du triceps sural couplé à de la proprioception et des étirements seraient des éléments à inclure dans un programme de ré-athlétisation global à mener en parallèle de cette pose de pied afin d'envisager une reprise progressive permettant aux structures musculo-squelettiques de se réorganiser et de se reconditionner à la pratique du trail dans l'objectif d'une reprise sans récive. Cependant beaucoup d'autres facteurs peuvent induire cette pathologie. D'où l'importance de prendre le temps d'interroger le patient et de faire un bilan détaillé, afin d'envisager le problème de la tendinopathie d'Achille dans sa globalité et traiter la cause et non la conséquence pour limiter la chronicité et les récives.

Sommaire des annexes

Annexe 1 : Composition du tendon

Annexe 2 : Courbe tension – déformation du tendon

Annexe 3: Le tendon d’Achille : insertions distale et proximale

Annexe 4: Rapport du tendon d’Achille avec l’aponévrose plantaire

Annexe 5 : Physiopathologie du tendon d’Achille

Annexe 6 : Appareil tricipito-calcaneéo-plantaire

Annexe 7 : Pose du pied

Annexe 8 : Impact factor des articles étudiés

Annexe 9 : Etude de la pose de pied en condition de course avec Kilian. Jornet.

Annexe 10 : Activité musculaire du membre inférieur pendant la course.

Annexe 11 : Relation entre le fascia plantaire et le paratendon achilléen

Annexe 12 : Cinématique et force verticale de réaction au sol

Annexe 13 : Schéma de l’arche longitudinale lors de la pose FFS et RFS

Annexe 14 : Force verticale de réaction au sol en fonction des conditions de pose de pied chaussées ou pieds nus

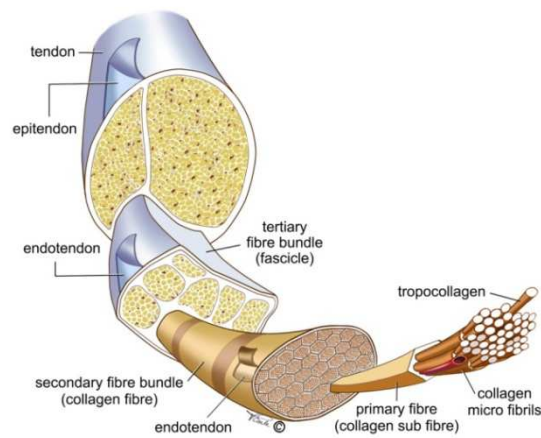
Annexe 15 : Force vertical de réaction au sol

Annexe 16 : Tableau récapitulatif des principales études de ce mémoire

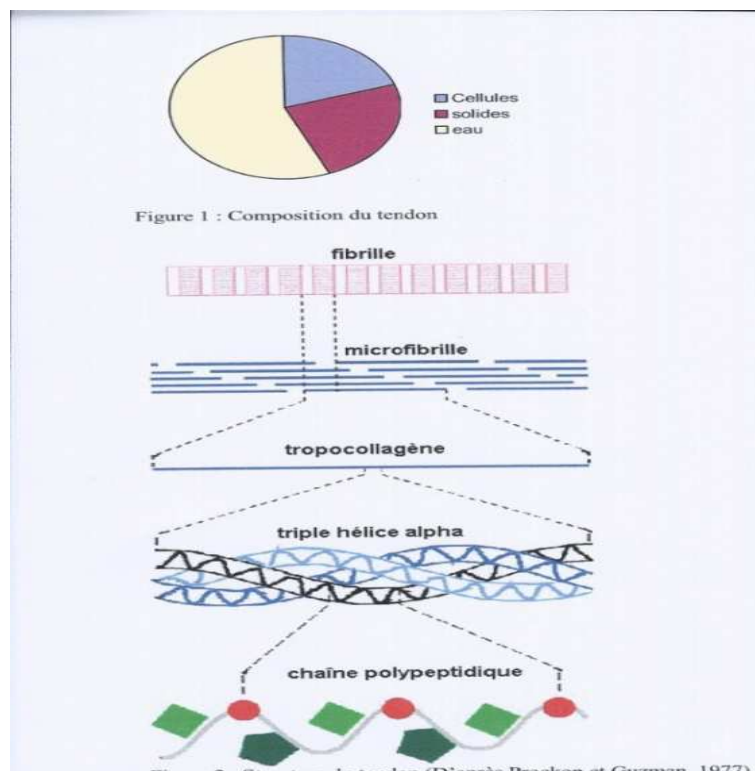
Annexe 1 : Composition du tendon

<http://lesuividusportif.com/savoir-et-comprendre/focus-sur-la-tendinite/>

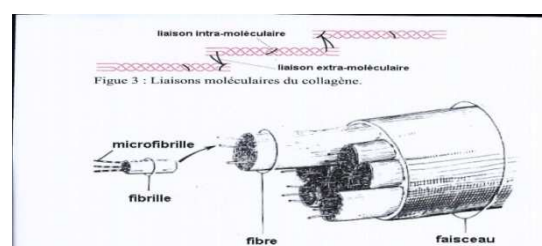
http://prevost.pascal.free.fr/public/pdf/SSPP5_tendon.pdf



Composition du tendon sur le plan macroscopique.



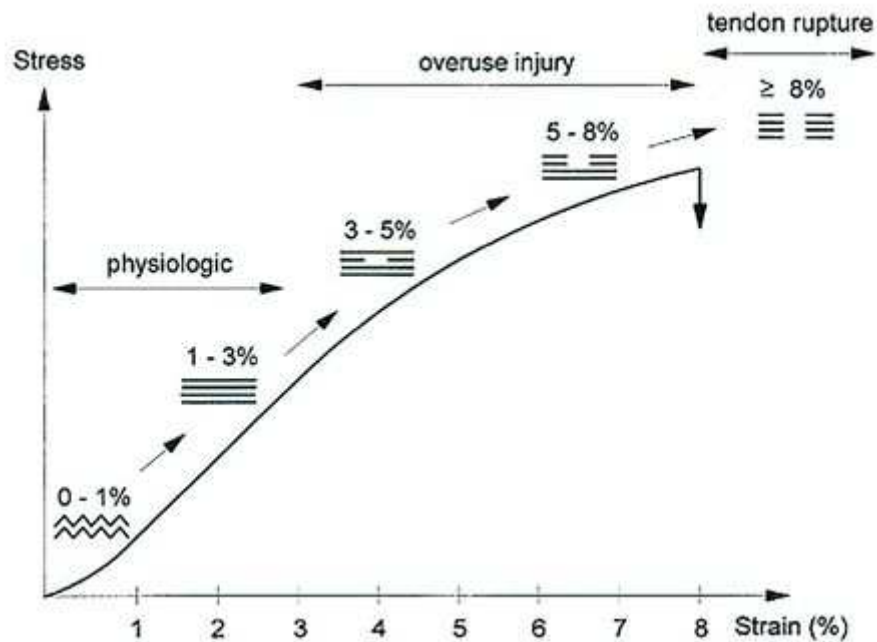
Structure du tendon.



Liaison moléculaire du collagène.

Annexe 2 : Courbe tension – déformation du tendon

Ziltener JL, et al. [15]



Zone physiologique :

Pour une extension inférieure à 4%, le tendon garde un comportement élastique. A l'arrêt de la traction, il retrouve sa longueur initiale

Zone de sur-sollicitation pathologique :

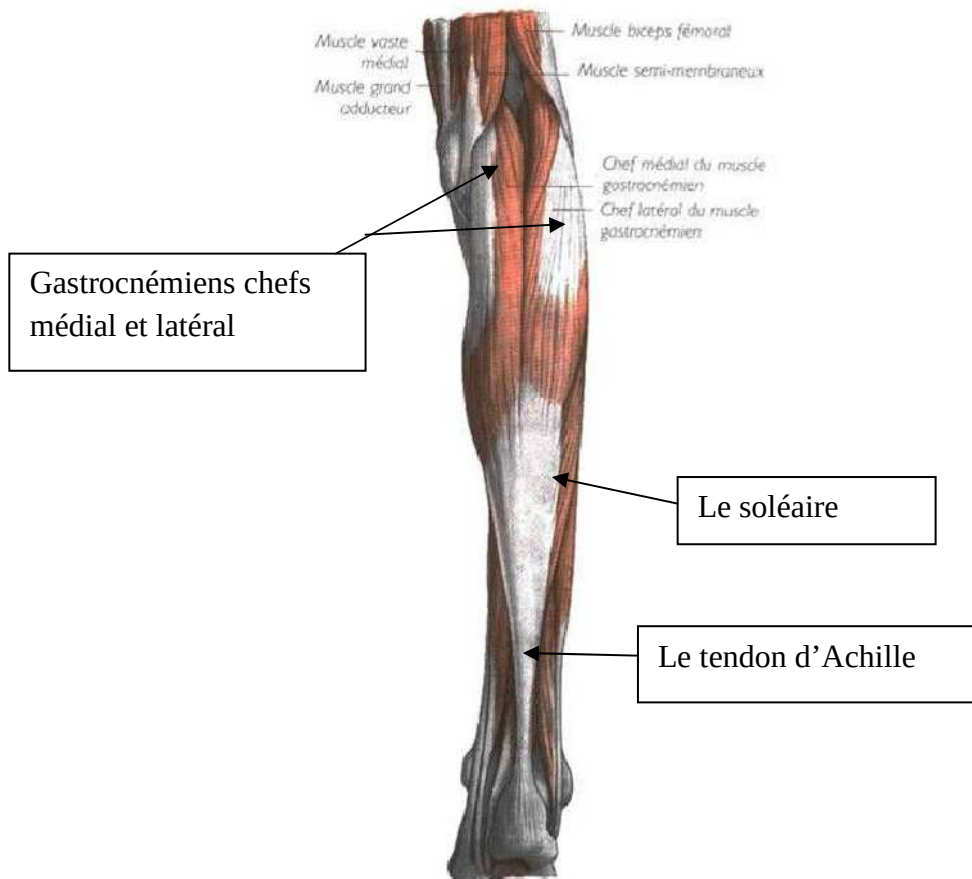
Au-dessus de 4% d'extension, des lésions sont présentes avec des ruptures partielles.

Zone de rupture :

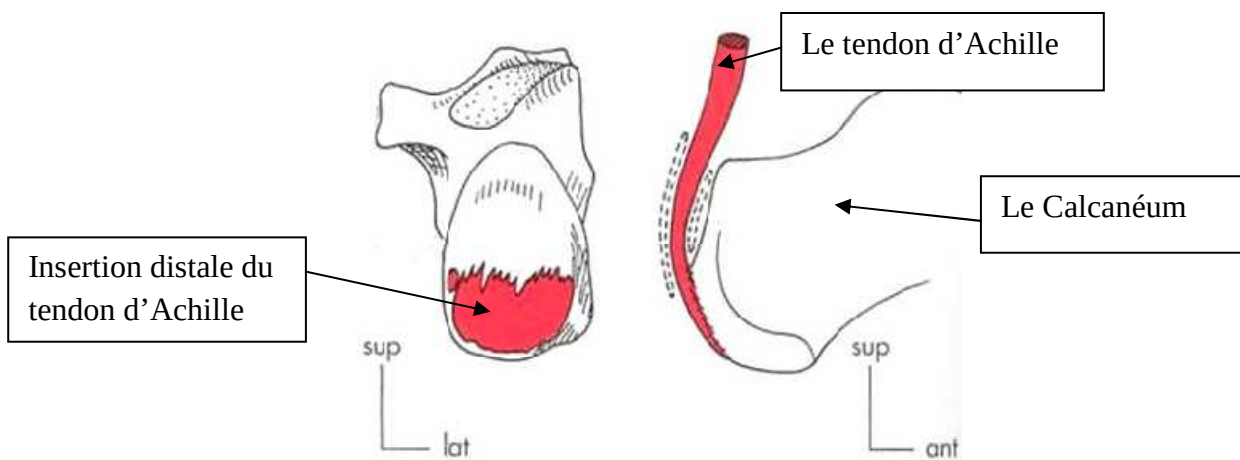
A partir de 7% à 8% d'extension, les lésions sont complètes.

Annexe 3: Le tendon d'Achille : insertions distale et proximale

http://iconographie.sante.univ-nantes.fr/gestilab1/components/com_booklibrary/ebooks/LETOUVET_Bastien.pdf



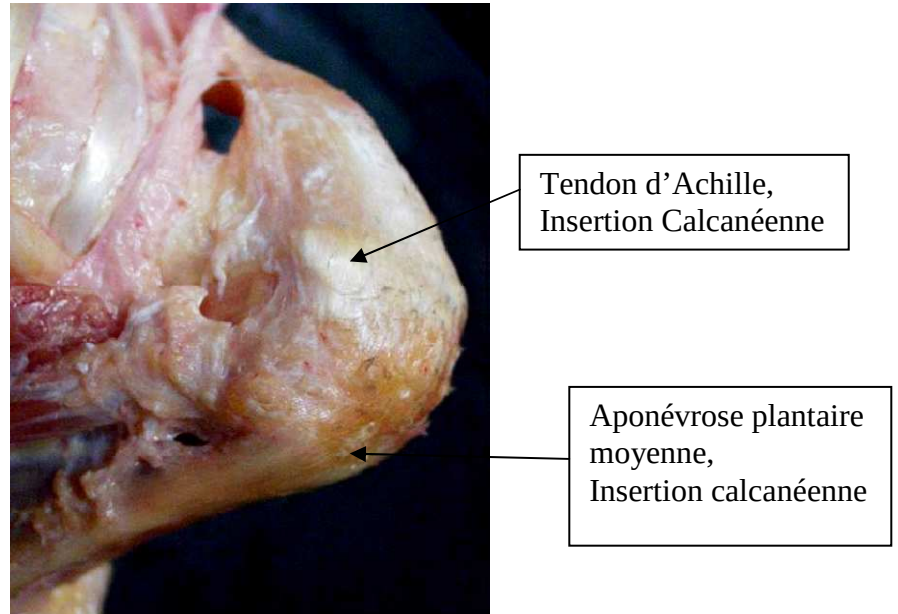
Les rapports musculaires du tendon d'Achille avec le triceps sural.



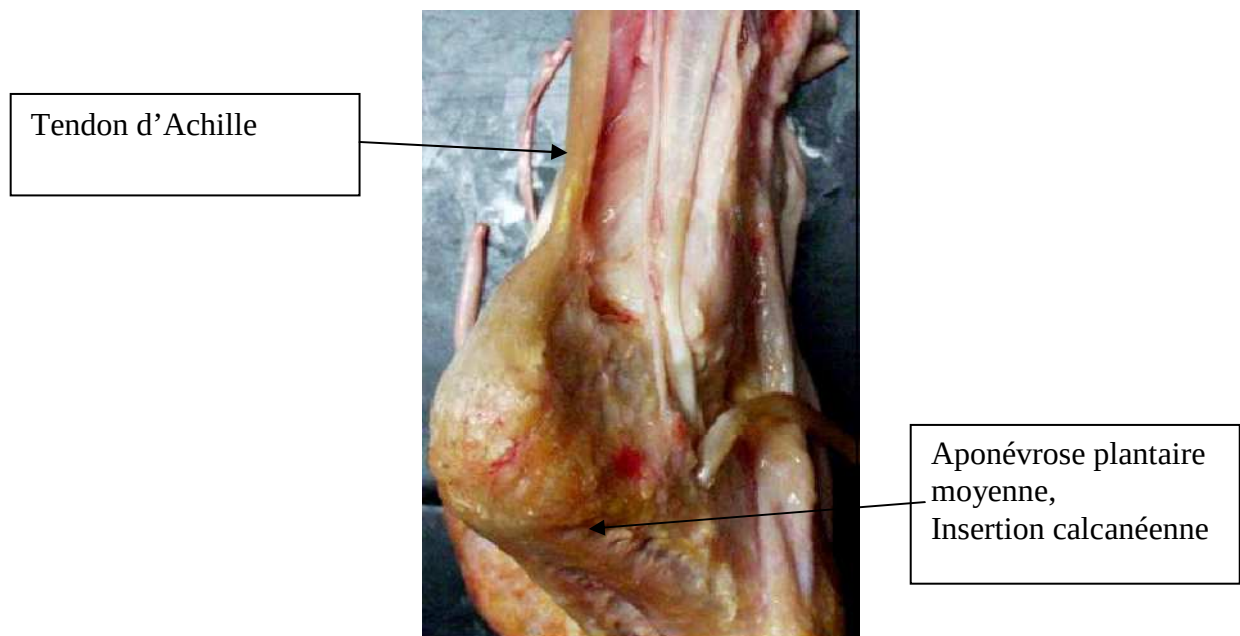
Insertion distale du tendon d'Achille.

Annexe 4: Rapport du tendon d'Achille avec l'aponévrose plantaire

http://iconographie.sante.univ-nantes.fr/gestilab1/components/com_booklibrary/ebooks/LETOUVET_Bastien.pdf



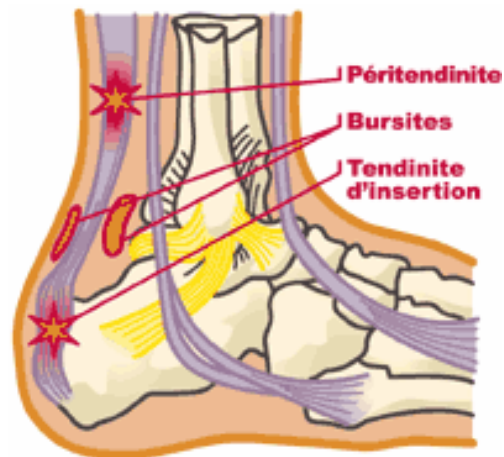
Insertion du tendon d'Achille à l'aponévrose plantaire
Pied droit, vue médiale



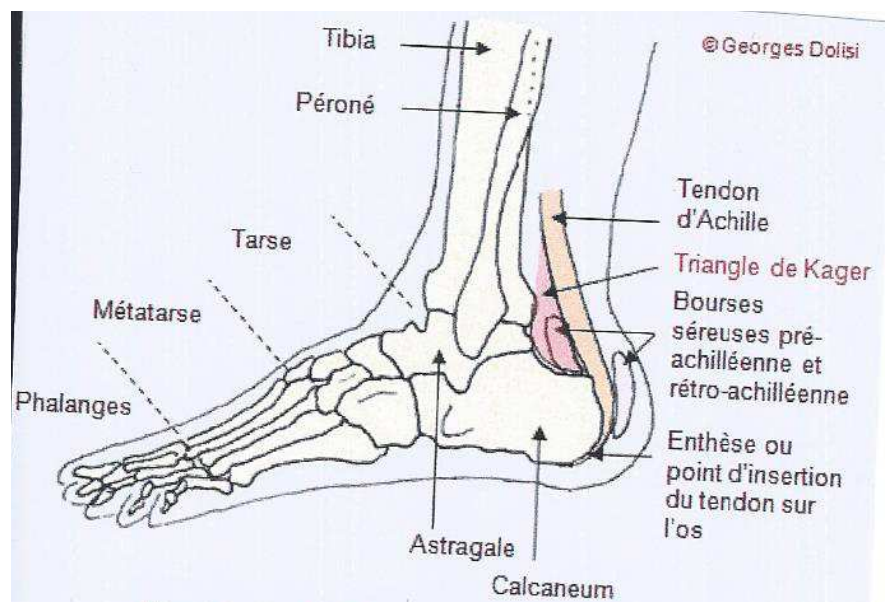
Vue latérale d'une jambe droite

Annexe 5 : Physiopathologie du tendon d'Achille

<http://entrainement-sportif.fr/tendinite-achille.htm>



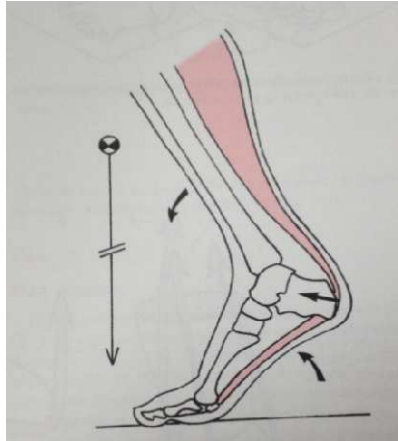
Localisation schématisée de la péri-tendinite, de la bursite et de l'enthésopathie.



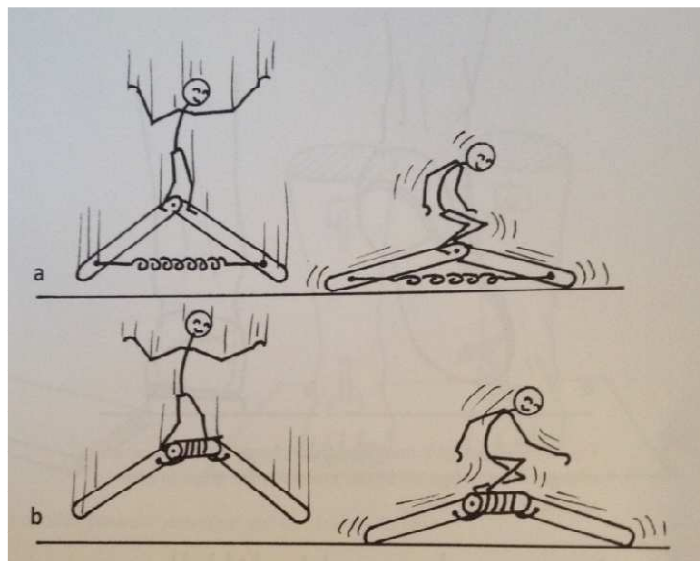
Position des bourses séreuses par rapport au tendon d'Achille.

Annexe 6 : Appareil tricipito-calcanéo-plantaire

Dufour M et Pillu M. [16]



Appareil tricipito-calcanéo-plantaire



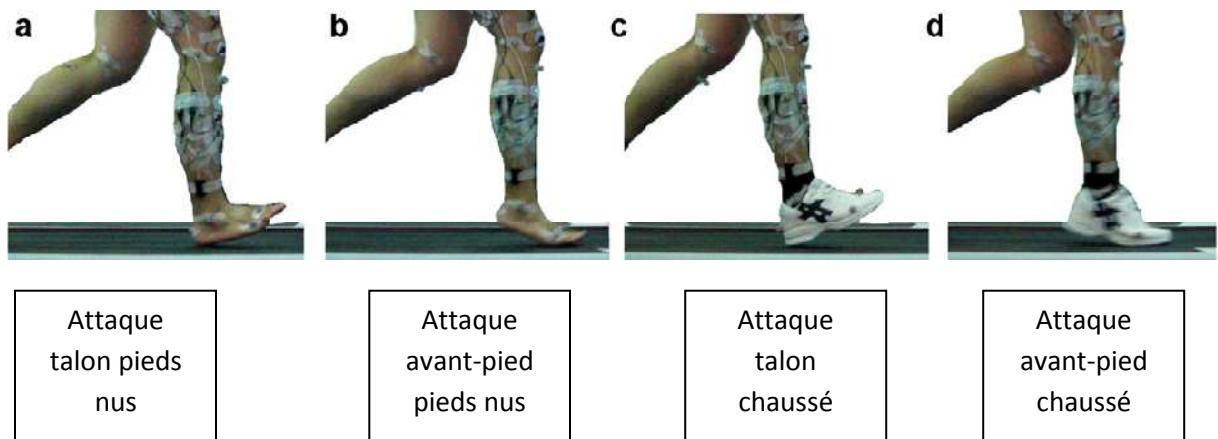
Rôle d'amortisseur de l'entrait plantaire et de la barre de torsion

Annexe 7 : Pose du pied

Giandolini M. [18]



Shih et al [30]

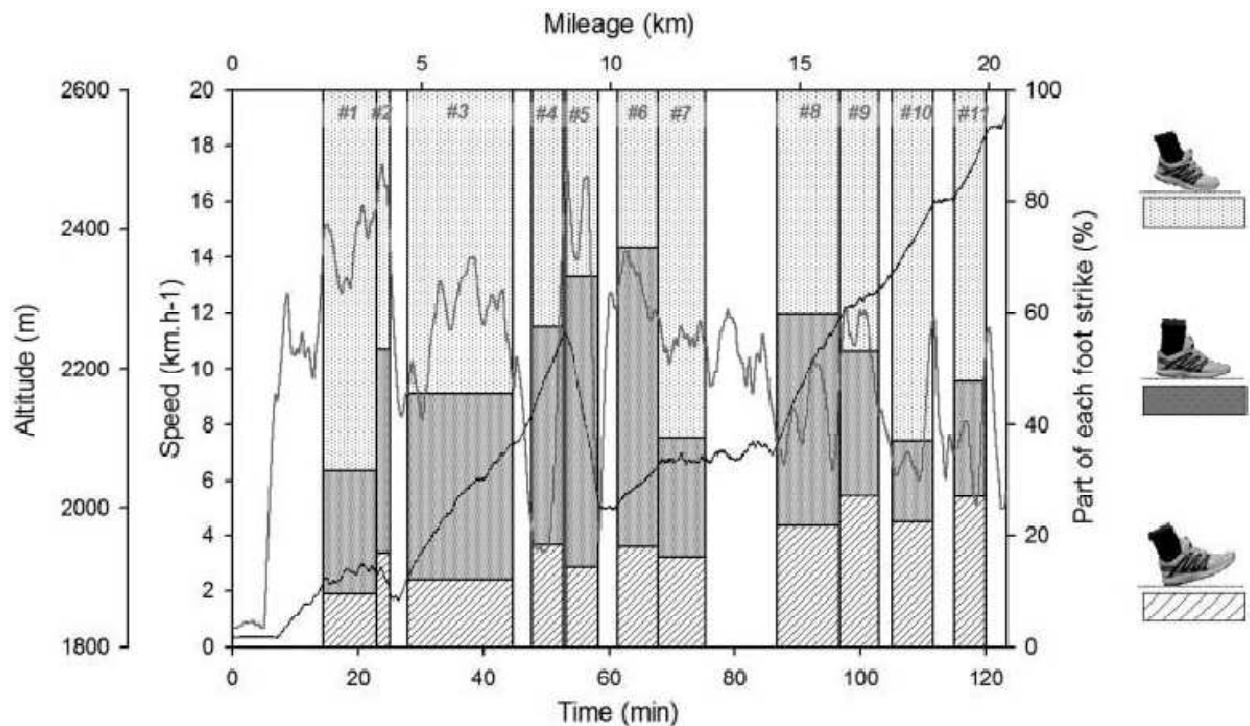


Annexe 8 : Impact factor des articles étudiés

Etudes	Année	Type d'étude	Source	Impact Factor
Paavola et al [1]	2005	Article in Foot and Ankle Clinics of North America	PubMed	0,76
Almonroeder T et al [2]	2013	Article in Annals of Biomedical Engineering	PubMed	3,23
Lopes AD et al [3]	2012	Systematic Review in Sports Medicine	PubMed	5,32
Lieberman DE [5]	2012	Article in Exercise and sport sciences reviews	PubMed	4,26
Kaux JF et al [10]	2011	Article in Journal of sports Science and Medicine	PubMed	1,03
Jarvinen TAH et al [11]	2005	Article in Foot and Ankle Clinics of North America	PubMed	0,76
Tam N et al [16]	2013	Article in British Journal of Sports Medicine	PubMed	5,03
Nunns M et al [20]	2013	Article in Journal of biomechanics	PubMed	2,75
Lieberman DE et al [21]	2010	Article in Nature	PubMed	41,46
Daoud A et al. [24]	2012	Retrospective Study in Medicine and Science in Sports and Exercise	PubMed	4,46
Esculier JF et al [25]	2015	Article in Journal of Foot and Ankle Research	PubMed	1,46
Goss D et al [26]	2012	Article in U.S. Army Medical Departement journal	PubMed	Non trouvé
Hollander K et al [27]	2015	A Randomized Crossover Study in Journal Pone	PubMed	3,23
Giandolini M et al [28]	2015	Article in Footwear Science	ResearchGate	Non trouvé
Ryan M et al [29]	2013	Article in British journal of sports medicine	PubMed	5,03
Shih et al [30]	2013	Article in Gait and posture	PubMed	2,75
Yong J et al [31]	2014	Article in Journal of biomechanics	ResearchGate	2,75
Stecco C et al [32]	2013	Article in Journal of Anatomy	PubMed	2,1
Pelletier-Galarneau M. et al [33]	2015	Article in American Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging	PubMed	3,25
G. Millet [34]	2011	Review Article in Sports Medicine	PubMed	5,04
Liebl D et al [35]	2014	Article in Human Movement Science	ResearchGate	1,6
Yu J [36]	2014	Article in Journal Physique Therapy Science	PubMed	Non trouvé
M. Giandolini et al [38]	2013	Article in European Journal of Applied Physiology	ResearchGate	2,19
Kulmala JP et al [39]	2013	Article in Medicine and Science in Sports and Exercise	PubMed	Non trouvé
Kubo K et al [40]	2014	Article in Journal of Sports Sciences	PubMed	2,25
Divert C et al. [41]	2005	Article in International Journal of Sports Medicine	PubMed	2,07

Annexe 9 : Etude de la pose de pied en condition de course avec Kilian.Jornet.

Giandolini M et al [28]

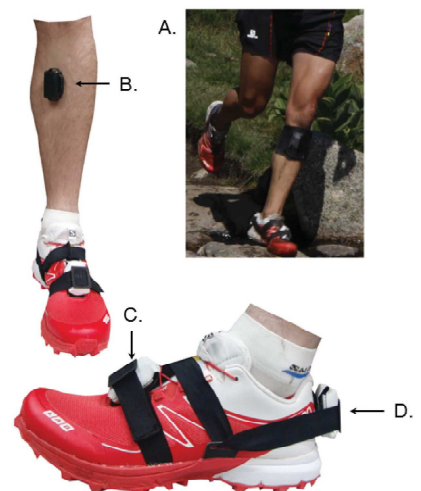


Courbe de l'altitude (ligne noire), courbe de la vitesse (ligne grise) sur les 20km de course. Les colonnes représentent les différentes poses de pied (RFS, MFS and FFS). Durant les sections variées du parcours. Les proportions des différentes foulées :

- avant pied (en haut) : 49%,
- médio-pied (au milieu) : 27%,
- talon (en bas) : 24%.

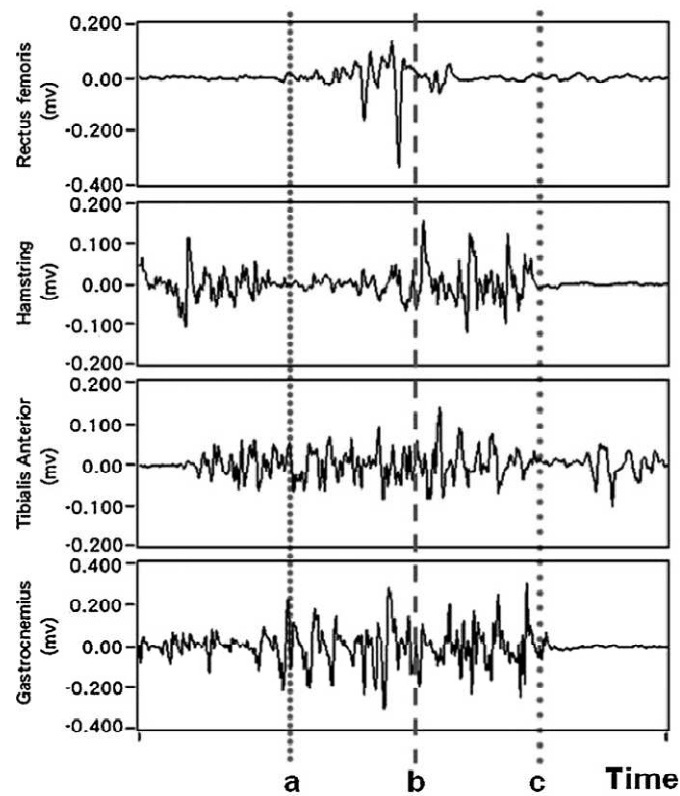
Au total 5530 pas ont été pris en compte dans l'analyse.

K. Jornet était équipé de trois capteurs, deux sur les chaussures et un sur le tibia synchronisé à un GPS (Global Positioning System) afin d'investiguer les effets de la vitesse de course, du dénivelé et de la fatigue musculaire sur les variables cinématiques et sur la force d'impact au sol.



Annexe 10 : Activité musculaire du membre inférieur pendant la course

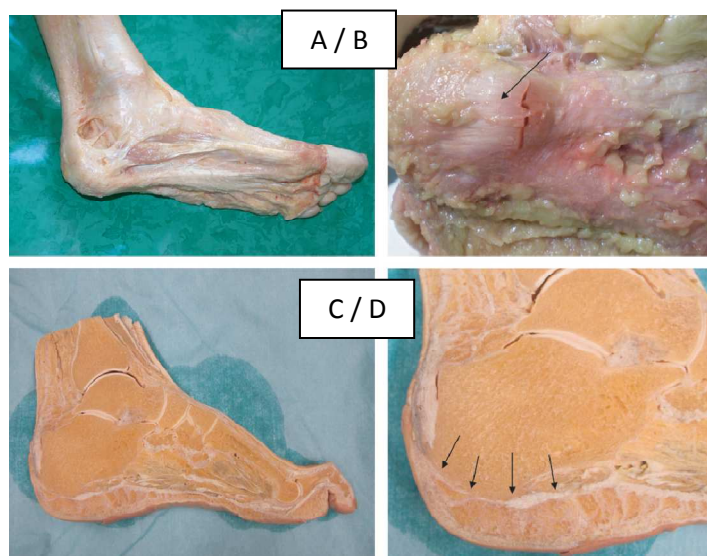
Shih Y et al. [30]



L'activité musculaire du membre inférieur pendant la course. Trois points sont représentés : (a) la pose du pied, (b) le moment de la charge maximale, (c) le moment où les orteils quittent le sol. L'activité musculaire est enregistrée en fonction de ses 3 périodes.

Annexe 11 : Relation entre le fascia plantaire et le paratendon achilléen.

Stecco et al. [32]



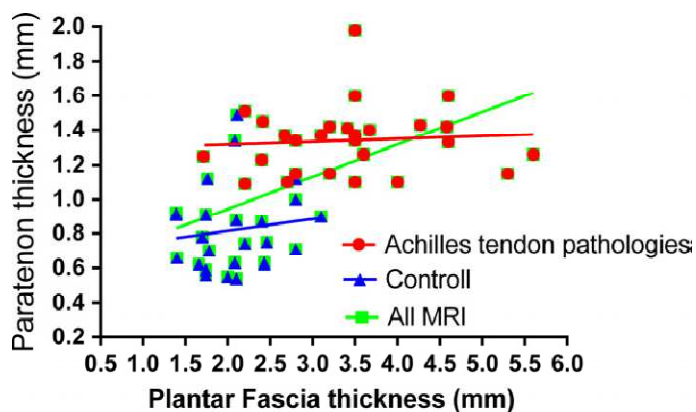
Continuité du fascia plantaire avec le paratendon du tendon d'Achille. (A, B) Dissection d'un cadavre. En B, le tissu fibreux sur le talon est évident. (C, D) Coupe du pied préservé dans du formol. Les flèches vers le bas montrent la continuité entre le fascia plantaire et le paratendon achilléen



A : 4,6mm

B : 1,74mm

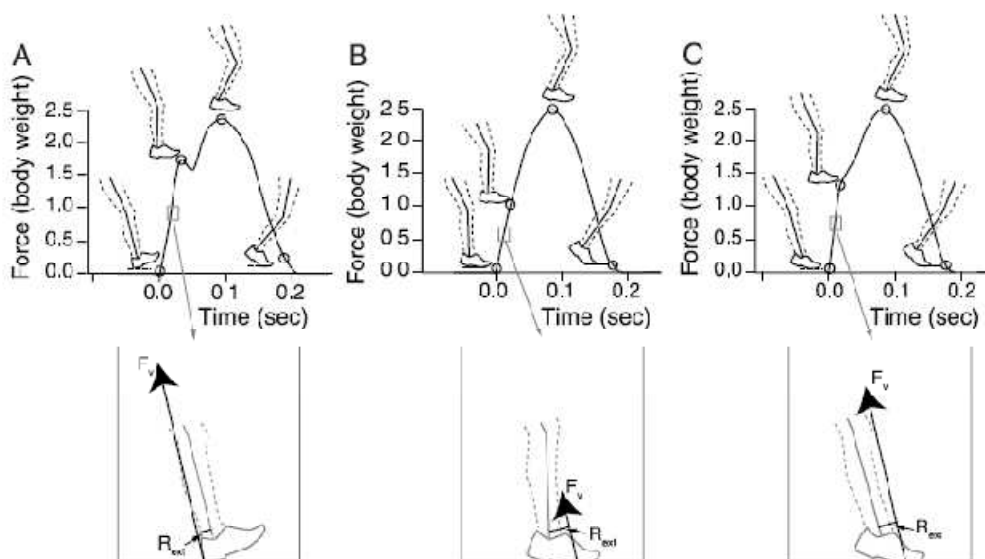
IRM d'un patient en bonne santé (B) et d'un patient présentant une tendinopathie d'Achille (A). La densité du fascia plantaire est de 4,6mm chez le patient présentant une tendinopathie d'Achille (A), Cette densité est de 1,74mm chez le patient sain (B).



Corrélation entre l'épaisseur du fascia plantaire et l'épaisseur du paratendon d'Achille entre un patient sain (bleu) et un patient présentant une tendinopathie d'Achille (rouge).

Annexe 12 : Cinématique et force verticale de réaction au sol

Lieberman DE. [5]



Cinématique et force verticale de réaction au sol à 3m/s en RFS (A), FFS avec une foulée courte (B), et FFS avec une foulée longue (C). Le pic d'impact transitoire est marqué en RFS, il est absent en FFS sur des foulées courtes (B). Ce pic d'impact transitoire est présent mais moins important qu'en RFS sur des foulées longues en FFS (C).

Illustration schématique du taux de charge du pic d'impact pour chaque style de pose de pieds. La production de la force verticale de réaction au sol (F_v) et le moment angulaire (R_{ext}). L'attaque RFS produit un grand moment de dorsiflexion alors que lors de l'attaque FFS, il y a un grand moment de flexion plantaire. Ce moment de flexion plantaire est plus important lors des petites foulées (C) que lors des grandes foulées (B).

Annexe 13 : Schéma de l'arche longitudinale lors de la pose FFS et RFS

Lieberman DE. [5]

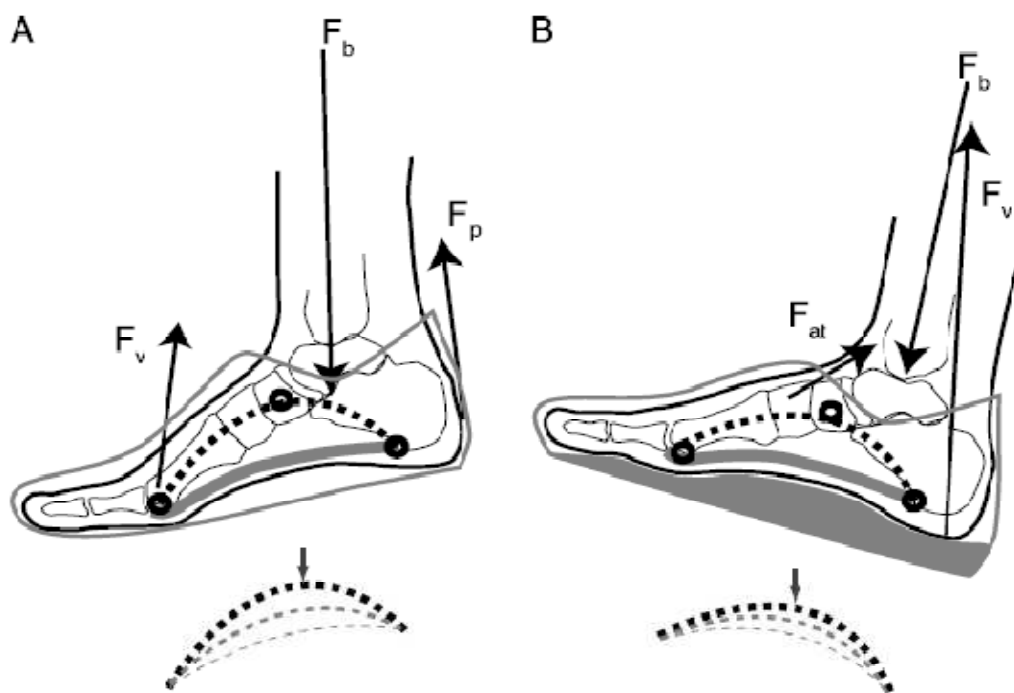


Schéma de l'arche longitudinale lors de la pose FFS (A) dans des chaussures minimalistes sans semelle dure, sans support d'arche et sans un talon élevé.

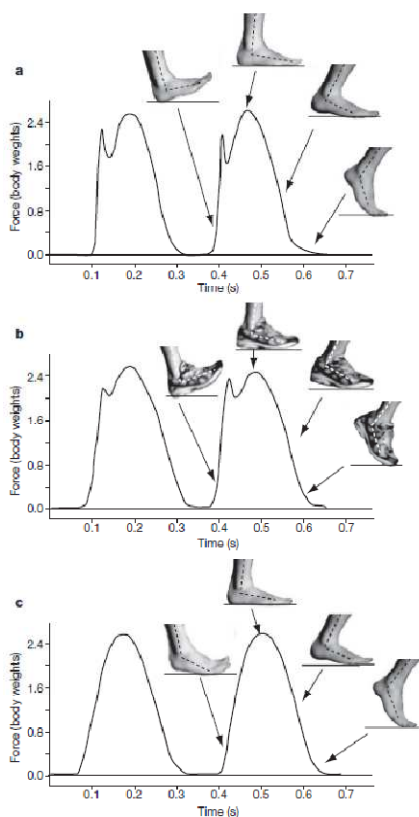
Schema de l'arche longitudinale en RFS (B) dans une chaussure avec un système d'absorption au talon et un support d'arche.

F_v est la force de réaction au sol à l'impact, F_b est la force de la masse du corps, F_p est la force de la flexion plantaire (en FFS) et F_{at} est la force du tibial antérieur (en RFS)

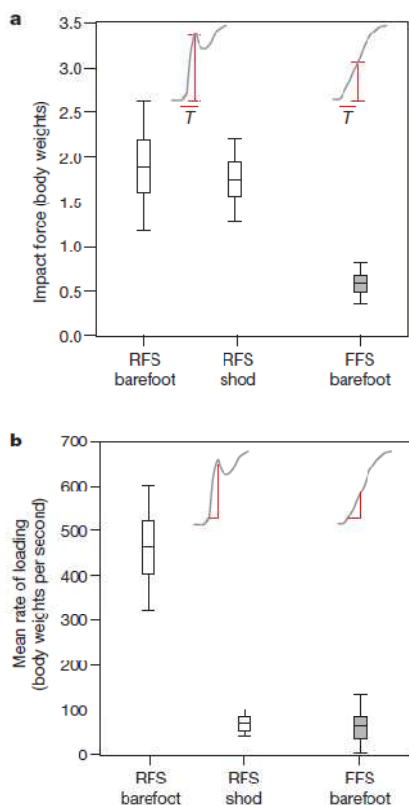
Il y a plus de tension de l'arche en FFS car cette pose de pied génère 3 points de force lors du moment de l'impact. Alors que le support d'arche de la chaussure limite la tension de l'arche.

Annexe 14 : Force verticale de réaction au sol en fonction des conditions de pose de pied chaussées ou pieds nus

Lieberman DE et al [21]



- Attaque talon, pieds nus. Cette attaque talon induit un impact transitoire qui se propage tout au long du squelette.
- Attaque talon, chaussée. L'impact transitoire est toujours présent en condition chaussée. Cependant le port de baskets ralentit la propagation de l'onde de choc. La magnitude diminue aussi d'environ 10%.
- Attaque avant-pied, nus pieds. L'impact transitoire est inexistant lors d'une prise d'appui avant pied. La force de réaction est amortie tout au long de la prise d'appui.



La magnitude (a) et le taux de charge (b) de l'impact transitoire par unité de masses corporelles pour les coureurs chaussés habitués à l'attaque talon (RFS) (groupe 1, boîte ouverte) et pour les coureurs habitués à être pieds nus FFS (groupe 3, boîte grise).

Le taux de charge est calculé à 200N à 90% de l'impact transitoire quand il est présent et à la phase de pose de pied quand il est absent.

Lors d'une prise d'appui talon, sans chaussure, la force d'impact est de $1,89 \pm 0,72$ le poids du corps.

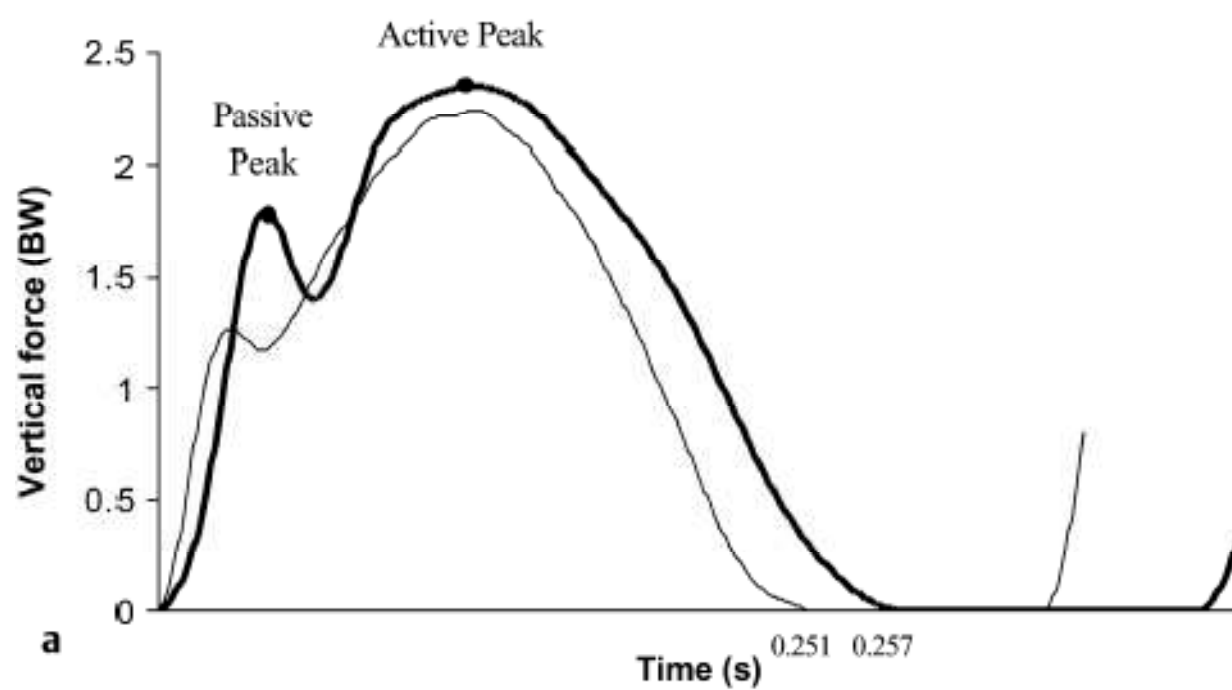
Lors d'une prise d'appui talon avec chaussure, la force d'impact est de $1,74 \pm 0,45$.

Lors d'une prise d'appui avant-pied, pieds nus, la force d'impact est de $0,58 \pm 0,21$ le poids du corps.

La nature des mesures (force vs temps) est représentée par les courbes grises et rouges.

Annexe 15 : force verticale de réaction au sol

Divet et al. [41]



Force verticale de réaction au sol en fonction du temps :
pieds nus (trait foncé) et chaussé (trait clair)

Annexe 16 : Tableau récapitulatif des principales études de ce mémoire

Auteurs, années	Objectif de l'étude	Protocole utilisé	Résultats	Intérêt pour le mémoire
Goss G et al. 2012. [26]	L'objectif de cette étude était d'évaluer l'association entre le choix de la chaussure avec la pose de pied et d'identifier les différentes localisations de blessures en fonction des conditions de chaussage.	904 coureurs sur les 2509 recrutés ont participé à l'étude. Ils ont été recrutés dans les clubs de course à pied, à l'université et à l'armée. Cette étude consistait à répondre à 41 questions pendant une période de 16 mois. Une banque de données a analysé et comparé les questionnaires afin d'évaluer la pose de pied, le chaussage préférentiel et les antécédents de blessures. 3 groupes sont constitués : un groupe chaussé de baskets traditionnel, un groupe chaussé avec des minimalistes et un groupe pieds nus. L'incidence des blessures spécifiques est comparée dans les 3 groupes.	La chaussure est significativement associée à la pose de pied $\chi^2_4=143.4$, $P<.001$ Les coureurs pieds nus ou chaussés en minimaliste ont une pose de pied au sol FFS et rapportent moins de blessures aux membres inférieurs que ceux qui sont chaussés traditionnellement. Les coureurs chaussés sont 3,41 fois plus à risque de signaler des blessures que ceux habitués au port de chaussure minimaliste (46,7% trad vs 13,7% mini). Les coureurs expérimentés avec des minimalistes reportent moins de blessures globales et moins de blessures spécifiques que les coureurs chaussés traditionnellement	La pose de pied est significativement corrélée au type de chaussure avec une pose de pied FFS pour les coureurs pieds nus ou minimaliste. Les coureurs portant des baskets traditionnels reportent plus de blessures du membre inférieur que les coureurs avec des minimalistes.
Hollander K et al. 2015. [27]	Analyser l'influence des conditions de chaussages sur la cinématique de course et surtout élucider le possible mimétisme de la course entre des chaussures minimalistes et la course nus pieds.	35 coureurs : 22 hommes, 13 femmes avec une pose de pied FFS (2 sujets) et RFS (31 sujets). Analyse en 3D cinématique sur tapis de course avec 8 caméras. Mesure de l'angle de la cheville et du genou à la pose de pied, ainsi que la longueur et la fréquence des pas. Ordre randomisé avec 4 conditions de course: pieds nus, chaussures minimalistes sans amorti, chaussures minimalistes avec amorti et chaussures de course standard. Chaque participant court à 3 vitesses différentes : ($v_1 = 2.22$ m.s-1, $v_2 = 2.78$ m.s-1, $v_3 = 3.33$ m.s-1). 1' de repos entre chaque session de course de 30''	Les résultats montrent que les conditions de chaussages et la vitesse de course influencent significativement ($p<0,001$) l'angle de la cheville à la pose de pied ainsi que la longueur et la fréquence des pas. Une différence significative entre ces paramètres est aussi relevée ($p<0,001$) entre les coureurs nus pieds et les 3 autres conditions de chaussage. Le taux d'attaque talon était le moins fréquent chez les coureurs pieds nus : 58,6%, suivi par les coureurs portant les chaussures minimalistes sans amorti 62,9%, puis les coureurs avec les minimalistes avec amorti : 88,6% et enfin les coureurs avec les chaussures standards : 94,3%	La cinématique de course (l'angle de la cheville à la pose de pied ainsi que la longueur et la fréquence des pas) sur de longue distance est influencée par la pose de pied et la vitesse de course. L'angle de dorsiflexion et le taux de RFS sont moindres lors de la course pied nu et augmentent en condition de course chaussée avec de l'amorti. La cinématique de la course nus pieds se rapproche de celle de la course en minimaliste.

Lieberman DE (2010) [21]	L'objet de cette étude est d'analyser la pose de pied et l'impact de la force de réaction au sol entre les coureurs nus pieds et les coureurs chaussés.	63 coureurs regroupés en 5 groupes : 8 amateurs athlètes d'Harvard habitués aux baskets, 14 athlètes Kenyans de hauts niveaux portant des baskets après leur adolescence, 8 minimalistes barefoot, 16 coureurs n'ayant jamais porté de chaussures (kenyans allant à l'école pieds nus) et 17 enfants habitués aux baskets. Les sujets courent sur une piste indoor de 20m de long avec une plate forme de force pour enregistrer la force verticale de réaction au sol L'analyse cinématique en 3D avec caméra vidéo permet de mesurer les angles de la pose du pied par rapport au sol, de la cheville, du genou, et de la hanche. Après un échauffement tous les sujets sont enregistrés sur 5 à 7 passages par condition. Tous les sujets ont des marqueurs sur leurs articulations.	Les résultats montrent que les posent de pied sont variables en fonction des sujets et des groupes. Les coureurs habitués à porter des chaussures sont pour la majorité des coureurs ayant une attaque talon. L'attaque talon est facilitée par les chaussures avec un drop important. Les coureurs conservent l'attaque talon même quand ils courent nus pieds sur une surface dure. Cependant ils adaptent leur placement de pied avec une dorsiflexion de 7 à 10° en moins. Lieberman précise que quelques millimètres de matériaux absorbants suffisent à modifier notre pose du pied en passant d'une réception sur l'avant pied à une réception arrière pied.	Les groupes des coureurs nus pieds ou minimalistes utilisent préférentiellement une attaque avant pied ou médio pied en condition nus pieds ou chaussée. Le port de chaussure induit des changements cinématiques. Retirer les chaussures de running à celui qui y est habitué peut le conduire à adopter une foulée différente : la longueur du pas et du temps de contact diminue, la fréquence des foulées s'accélère, les flexions plantaires et du genou se majorent. Les chaussures avec un support d'arche et une semelle rigide génèrent une faiblesse des muscles du pied et diminuent la force de l'arche. De plus bien qu'ils soient confortables, l'amorti et le talon surélevé des chaussures, limitent la proprioception au niveau du pied. L'amorti ralentit le taux de charge, ralentit la propagation de la magnitude. En diminuant la sensation de choc l'amorti de la chaussure est un trompeur proprioceptif.
Giandolini M. et al. 2015. [28]	L'objet de son étude est d'analyser la pose de pied et les impacts associés de K. Jornet tout au long de la Kilian's Classik, 45km avec 1700m D+	Enregistrer en condition in-situ lors d'un trail, à l'aide de trois capteurs, deux dans les chaussures et un sur le tibia, synchronisés à un GPS, la vitesse, le dénivelé et le temps de course ainsi que les variables cinématiques et la force d'impact au sol sur K. Jornet.	L'analyse des résultats révèle une corrélation significative entre le dénivelé et la vitesse de course ($r = -0.93$, $P < 0.0001$). La fréquence des pas est corrélée significativement avec le dénivelé et la vitesse ($r = -0.86$ et $r = 0.80$, $P < 0.001$). Sur l'ensemble des 20km de course enregistrés, la pose de pied de K. Jornet se répartit en	Afin d'économiser les fléchisseurs plantaires très sollicités lors de la pose avant pied, quand la fatigue se fait plus présente Kilian modifie son pattern global de pose de pied en augmentant l'attaque par le talon au cours de la course. Malgré le fait que Kilian court sur des distances

			moyenne à 18% de RFS, 33% de MFS et 49% de FFS avec une attaque avant pied qui prédomine. Il est noté une augmentation de l'attaque talon au fur et à mesure que la course avance. Lors des montées l'attaque avant-pied est privilégiée ce qui augmente l'activation des fléchisseurs plantaires.	longues avec des baskets et en trail il conserve sur la globalité du parcours sa foulée avec sa pose de pied avant pied. Cette pose de pied va évoluer en fonction du dénivelé et de la fatigue musculaire.
Ryan M. et al. 2013. [29]	Etude randomisée sur les risques de blessures et les douleurs associées à la course en chaussure minimaliste.	Analyse des effets cliniques de 3 différents modèles de chaussures sur 101 coureurs. Les coureurs habitués aux minimalistes et ceux avec des antécédents de tendinopathie d'Achille et de fascite plantaire étaient exclus de l'étude. Etude qui portait sur la préparation d'un 10km sur 12 semaines d'entraînement. 3 conditions de chaussages ont été testées, les baskets neutres, les minimalistes partielles et les minimalistes. Le protocole consistait à une augmentation progressive du temps de course et de la distance en commençant par 160 minutes et 15km la semaine 1 pour aller à 240 minutes avec 35km la semaine 10. Les participants couraient en minimaliste 19% du temps en semaine 1 pour aller à 58% du temps en semaine 10.	23 blessures sont reportées sur la période des 12 semaines d'entraînement avec un taux de blessure de 23% • La chaussure neutre remporte le moins de blessures : seulement 4 • la chaussure partiellement minimaliste le plus de blessures : 12 • Les coureurs du groupe minimaliste ont le plus de douleurs au mollet et au tibia (p<0,01)	Courir avec des chaussures minimalistes semble augmenter la probabilité d'avoir une blessure, avec pour les minimalistes purs l'augmentation des douleurs au mollet et au tibia. La pose de pied au sol médio ou avant pied implique une sur sollicitation des fléchisseurs plantaires ce qui augmentent les contraintes mécaniques appliquées au tendon d'Achille pouvant aller de 1 à 15%.
Shih Y. 2013. [30]	L'objet de cette étude est de montrer que la pose de pied est plus importante que les conditions de chaussage dans la prévention des blessures liées à la course à pied.	Une analyse cinématique, cinétique et électromyographique (des muscles : droit fémoral, tibial antérieur, biceps fémoral, et gastrocémien) est effectuée sur 12 hommes sur tapis de course dans quatre conditions différentes: course pieds nus attaque avant pied, course pieds nus attaque talon, course chaussé attaque avant pied et course chaussé attaque talon. L'analyse cinématique est conduite dans un laboratoire utilisant 10	Les coureurs habitués à courir en basket se blesseront plus facilement en courant pieds nus et en continuant à utiliser une réception talon. L'extrémité du membre inférieur peut gagner plus en compliance avec une pose de pied FFS. Une différence significative de la cadence est calculée entre les conditions de course chaussée ou nus pieds quelque soit la pose de pied. La cadence augmente en barefoot. L'analyse	D'un point de vue cinétique et cinématique la pose du pied joue un rôle plus important que les conditions de chaussage sur l'influence de ces paramètres (force verticale de réaction au sol, du taux de charge, raideur de l'extrémité inférieure, temps de vol, cadence des foulées, angles articulaires): le coureur habitué aux baskets peut

		caméras pour une analyse en 3D. Les analyses cinétiques et cinématiques sont évaluées dans les quatre conditions lors d' 1 minute de course. Les coureurs ont 2 minutes de repos entre chaque intervalle de course. Tous les coureurs portent le même modèle de basket.	cinématique montre que les coureurs adoptant une FFS ont une réduction significative du taux de charge, lequel est considéré comme un facteur important de blessures de course à pied. Le taux de charge en FFS ne montre pas de différence significative entre les différentes conditions de chaussage (barefoot ou chaussé). Les résultats électromyographiques montrent une activité significativement plus importante des muscles gastrocnémiens et du tibia antérieur lors de la course en attaque avant pied par rapport à une réception talon lors de la pré-activation musculaire et lors de la phase d'appui que ce soit en condition pieds nus ou chaussés.	gagner plus en absorption de choc en changeant sa pose de pied qu'en courant avec ses baskets. Lors de l'attaque avant pied, une plus grande activité des muscles gastrocnémiens est observée. Cela implique un recrutement plus important des fibres de ce muscle et une traction significative au niveau du tendon d'Achille. Lors de la course en FFS, le pied est posé avec une flexion plantaire et suivi d'une flexion dorsale contrôlée de façon excentrique par les muscles du mollet. Ce travail excentrique engendre des contraintes importantes sur le tendon d'Achille.
Yong J. 2013. [31]	L'objectif de cette étude est de quantifier l'activité musculaire chez les coureurs RFS par rapport au coureurs FFS	Le protocole consiste à enregistrer l'activité cinématique et mesurer l'activité électromyographique (de 10 muscles) ainsi que la force de réaction au sol de 22 coureurs : 12 coureurs talons et 10 coureurs avant pieds sur un tapis de course à 4m/s	Les résultats de l'électromyographe montrent qu'au début de la phase portante, aucune différence significative n'est trouvée dans l'activation du TA et des fléchisseurs plantaires entre FFS et RFS. Aucune différence d'activation musculaire n'est relevée pendant la phase oscillante. A la fin de la phase oscillante, on retrouve une faible activité musculaire du TA pour les coureurs FFS par rapport au coureurs RFS ($p=0,001$). En revanche une activité musculaire importante est enregistrée pour les gastrocnémiens médial et latéral en attaque FFS par rapport à la pose de pied talon. Aucune différence significative n'est notée pour l'activité du soléaire entre FFS et RFS.	L'importante activité musculaire des gastrocnémiens peut exposer ces structures à des risques de blessures. La différence d'activité musculaire entre les coureurs FFS et les RFS permet de mieux expliquer les différents types de blessures.

Stecco C et al. 2014. [32]	Leur étude porte sur la relation entre le fascia plantaire, le tendon d'Achille et son paratendon.	Le protocole a consisté en l'analyse de 52 IRM de patients présentant des chevilles pathologiques ou des pieds douloureux. 2 groupes sont distingués. Un groupe présentant des signes d'inflammation au niveau du tendon d'Achille et un groupe sans présence de signe inflammatoire. Les épaisseurs du fascia plantaire et du paratendon sont mesurées et regroupées dans des données statistiques.	Ces analyses montrent que le fascia plantaire est étroitement relié au paratendon du tendon d'Achille en regard du périoste du calcaneum. 27 IRM sur 52 montrent des signes d'inflammation ou de dégénérescence du tendon d'Achille avec un fascia plantaire épaissi à 3,43mm (+/- 0,48) Les IRM ne montrant aucun signe d'inflammation ou de dégénérescence du tendon d'Achille, présentent un fascia plantaire d'une épaisseur de 2,09mm (+/- 0,24). La différence d'épaisseur de 1,29mm (+/- 0,57) est statistiquement significative. Il y a une corrélation significative entre l'épaisseur du fascia plantaire et le paratendon.	La relation entre le fascia plantaire et le tendon d'Achille indique que la structure du triceps sural et du tendon d'Achille peut être lésée dans les pathologies du fascia plantaire. Le fascia plantaire a un rôle dans le support de l'arche longitudinal du pied ainsi que dans la proprioception et la coordination motrice périphérique.
Pelletier-Galarneau M et al. 2015. [33]	L'objet de cette revue était d'analyser les blessures du pied et de la cheville, les plus communes en fonction des images relevées par scintigraphie osseuse avec le SPCT-CT.	Le protocole consiste à analyser les différentes blessures de course au niveau du pied et de la cheville avec. l'utilisation de l'image SPECT-CT qui autorise une meilleure localisation et une meilleure détermination des pathologies osseuses, avec un résultat qui augmente la précision du diagnostic.	Les résultats montrent que la fasciite plantaire est associée à un déficit de flexibilité des muscles du mollet et du tendon d'Achille participant aussi à l'arche du pied. Les coureurs FFS augmentent la charge sur le tendon d'Achille, ce qui augmente le risque de blessures. Deux tiers des blessures du tendon d'Achille sont des paratendinites et un cinquième sont des bursites et des tendinopathies d'insertion. Les autres blessures du tendon d'Achille sont des blessures de la jonction-myotendineuse et des tendinoses..	L'imagerie permet de donner les localisations des lésions qui affectent le tendon. Une augmentation de sang est observée à l'insertion du calcaneum pour les enthésopathies ;
Millet G. 2011. [34]	Cette étude porte sur les relations entre la fatigue neuro-musculaire et les stratégies d'adaptation et de	Etude réalisée sur la fatigue neuro musculaire lors de l'Ultra-trail du Mont Blanc (166km) et le Tor des Géants (330km).	70% des athlètes de haut niveau et 85% des débutants prennent appui sur l'arrière pied lors d'épreuves de longue distance. D'après Millet G, ce fort pourcentage peut s'expliquer en partie par la fatigue musculaire des fléchisseurs plantaires qui ne	La fatigue musculaire induit une faiblesse des fléchisseurs plantaires qui ne peuvent assurer leur travail excentrique sur de longue distance. La fatigue peut-être comprise comme un régulateur performant, une

	performance en course à pied lors d'ultra marathon		peuvent assurer leur travail excentrique sur de longue distance. Les résultats montrent une diminution de la force musculaire des extenseurs des genoux et des fléchisseurs plantaires de 30 à 40%, ce qui engendre une diminution de force développée sur chaque pas.	stratégie de conservation de l'intégrité des cellules de la fonction et de la survie.
Liebl D et al. 2014 [35]	L'objectif de cette étude est de tester la différence de force des fléchisseurs plantaires entre une attaque avant pied et une attaque talon.	Ce protocole est réalisé sur 119 sujets, courant chaussée et nus pieds à une vitesse de 3,5m/s. La force des fléchisseurs plantaires est déterminée par une contraction maximale volontaire (CMV) isométrique avec un dynamomètre, les sujets sont assis et ils maintiennent la CMV pendant 5'', avec genou fléchi à 90° puis avec genou en extension 180°. Chaque sujet à 3 essais, la meilleure performance est retenue pour les analyses. La course s'effectue sur une piste en Tartan de 200m pieds nus et chaussée.	2 groupes sont constitués : 1 groupe FFS et un groupe RFS. Les résultats de cette étude montrent que les coureurs FFS sont capables de produire un moment articulaire et une contraction maximale volontaire de leurs fléchisseurs plantaires et des tractions sur le tendon significativement plus important que les coureurs RFS. La différence est de 0,28Nm/kg.	Les coureurs FFS développent des capacités de force et d'endurance des fléchisseurs plantaires supérieurs aux coureurs RFS.
Yu J. 2014. [36]	L'objectif de cette étude était de comparer le changement d'activité entre le côté affecté et le côté sain chez des coureurs présentant une tendinopathie d'Achille unilatérale.	Cette étude inclue 18 participants constitués d'hommes et de femmes ayant une tendinopathie d'Achille chronique sur une seule jambe et avec plus d'un an d'expérience de course à pied. Tous les sujets réalisent un exercice concentrique et excentrique avec le tendon d'Achille en flexion plantaire max et en dorsiflexion max pendant 8''. Les résultats sont obtenus par électromyographie.	Tous les muscles examinés montrent une augmentation significative du pourcentage de la contraction max volontaire lors de l'exercice concentrique comparé à l'exercice excentrique. Comparé avec le côté sain, le côté atteint montre une augmentation significative du pourcentage de la contraction max volontaire du droit fémoral, du tibial antérieur et du gastrocnémien latéral.	Les coureurs avec une tendinopathie d'Achille montrent une augmentation de l'activité du gastrocnémien médial lors de l'exercice de performance excentrique.
Lieberman DE 2012. [5]	Cet article traite de la course pied nu et de ses répercussions biomécaniques en lien avec la	Etude cinématique et cinétique sur tapis de course avec plate forme de force pour évaluer le force de réaction au sol, le pic d'impact transitoire, la magnitude de l'onde de choc entre les coureurs pieds nus et	Lors d'une prise d'appui FFS la force d'impact est de 0,58 fois le poids du corps ce qui est 3 fois moins que les coureurs talons nus pieds qui est de 1,89 et chaussés de 1,74 le poids du corps. La force de réaction au	Lieberman précise que les coureurs avant pied qu'ils soient chaussés ou pieds nus encourrent moins de blessures causées par la force de pic d'impact car lors d'une prise d'appui

	performance et les blessures.	chaussés avec une pose de pieds FFS, MFS, RFS.	sol, mesurée sur une plate forme de force lors de l'impact transitoire pour un coureur qui attaque par le talon nu pieds à 4m/s est de 400 à 600 fois le poids du corps par seconde et la magnitude de ce pic est comprise entre 1,5 et 2,5 le poids du corps. L'impact ainsi créé envoie une onde de choc mesurée dans le tibia après quelques millisecondes et cette onde de choc est enregistrée au niveau de la tête 10 millisecondes plus tard. L'élévation et l'amorti des chaussures modernes limitent la magnitude du pic d'impact transitoire causé par l'attaque talon d'environ 10% et ralentissent le taux de charge de 70 à 100 fois le poids du corps par seconde. L'attaque talon sur une surface dur apparait alors plus confortable dans une chaussure moderne mais la chaussure n'élimine pas le pic d'impact transitoire de la force de réaction au sol..	avant pied, l'impact transitoire est inexistant. Une pose de pied avant pied ou médio pied diminue d'environ 50% le taux de charge lors de la phase d'impact. De fortes amplitudes de charge qui traversent rapidement le corps sont enregistrées et contribuent ainsi à la haute incidence des blessures associées à la course à pied et plus particulièrement les fractures de stress tibial et de syndrome fémoro patellaire mais limite le risque de tendinopathie d'Achille. L'attaque talon génère une force de collision de 1,5 à 3 fois le poids du corps dans les 50 premières millisecondes, une décélération soudaine de la masse du corps et un impact transitoire associé
Giandolini M et al. 2013. [38]	L'objet de cette étude était de quantifier le taux de charge lors de la pose de pied chez des coureurs débutants en fonction de 3 conditions de course différentes.	9 sujets (6 hommes et 3 femmes) ayant une attaque RFS réalisent 5 essais de 5 minutes de course pendant lesquels les données cinétiques et cinématiques sont mesurées sur 10 pas consécutifs sur un tapis de course. L'activité électromyographique du GL, du TA, du BF et du VM est enregistrée sur les différentes phases du cycle de course. Les sujets courent en fonction des 4 paramètres suivants : Avec des baskets, en augmentant la fréquence des pas de 10%, en adoptant une pose de pied MFS et en combinant les 3 interventions.	Le taux de charge est significativement réduit chez le coureur MFS (37.4 ± 7.20 BW s-1, -56.9 ± 50.0 %) et lors de l'intervention des 3 paramètres combinés (36.8 ± 7.15 BW s-1, -55.6 ± 29.2 %) par rapport aux conditions comparées à la norme (56.3 ± 11.5 BW s-1, both $P < 0.001$). Il n'y a pas de différences significatives sur le taux de charge, lors de la course chaussée et lors de la diminution de la fréquence des pas. L'activité musculaire enregistrée par l'EMG lors de la course en MFS montre une augmentation significative de la pré-activation du gastrocnémien latéral ($208 \pm$	La solution la plus efficace pour réduire le taux de charge lors de l'impact est le pattern MFS. Cette réduction peut être associée à une diminution du risque de blessures associée et spécialement les blessures ostéo-articulaires. En revanche cette pose de pied peut engendrer des blessures collatérales notamment des blessures de stress des métatarses, des périostites tibiales et des tendinopathies d'Achille si une prise en charge progressive n'est pas conduite. Cependant en pratique il est

		Le niveau de preuve significatif était pour $p < 0,005$.	97.4 %, $P < 0.05$) et une diminution significative de celle du tibia antérieur.	plus simple de jouer sur la foulée que sur la pose de pied.
Kulmala et al. 2013 [39]	Etude portant sur la charge impliquée sur les genoux et les chevilles lors d'une pose de pieds RFS et FFS	38 femmes sont retenues pour l'étude 19 femmes courent avec une attaque FFS et 19 femmes courent avec une attaque RFS. Les données anthropométriques sont mesurées et 34 marqueurs sont placés sur les sujets qui courent à 4m/s sur une piste de 15m. Une plate forme de force enregistre la force de réaction au sol. Une analyse cinématique et cinétique mesure les angles articulaires et les moments de forces au niveau des articulations du genou et de la cheville.	Les résultats montrent un moment de flexion plantaire de $3,12 \pm 0,40$ contre $2,54 \pm 0,37$ Nm/kg ; $P = 0,001$ et une force exercée sur le tendon d'Achille de 6.3 ± 0.8 vs 5.1 ± 1.3 body weight ; $P = 0.002$, plus importante lors d'une course FFS que lors d'une course RFS.	Les coureurs FFS ont une flexion plantaire de cheville plus importante et une charge sur le tendon d'Achille qui est augmentée ce qui induit une meilleure absorption des contraintes mais cela augmente le risque de tendinopathie d'Achille et de blessures au niveau du pied et de la cheville.
Daoud AI et al. 2012. [24]	L'objectif de cette étude est de déterminer si les coureurs type FFS ont un taux de blessures différents des coureurs types RFS	Cette étude a duré 5 ans sur 52 athlètes (29 hommes et 23 femmes), de l'Université d'Harvard, de l'équipe de cross country. Les informations, concernant les entraînements, étaient relevées quotidiennement. La pose de pied a été difficile à évaluer car elle était variable en fonction du type de course, de l'entraînement, de la fatigue et de la vitesse. Tous les athlètes reportaient leurs blessures après consultation auprès du même thérapeute. Les analyses statistiques ont été classées selon 4 variables en fonction du taux de blessures répétitives, du taux de blessures traumatiques et du taux de blessures prédictives d'une pose de pied FFS ou RFS.	Les résultats montrent que sur les 52 coureurs, il y a 69% de coureurs RFS et 31% de coureurs FFS. Les coureurs de type RFS présentent 2 fois plus de blessures de types répétitives que les coureurs de type FFS. Néanmoins, aucune différence significative n'existe entre ces 2 types de coureurs concernant les blessures traumatiques.	Les coureurs attaquant le sol par le talon sont plus nombreux que les coureurs FFS chez les athlètes de haut niveau en cross country. Les données statistiques mettent en lumière que le taux de blessures augmente si l'athlète est une femme, que le type de pose du pied est RFS, que les distances parcourues sont longues et que l'indice de masse corporelle est grand.
Kubo K et al. 2015. [40]	L'objectif de cette étude est de montrer la relation entre les propriétés du tendon d'Achille et les différents	41 hommes de haut niveau sur des épreuves de longue distance participent à cette étude. Le protocole consiste à déterminer les différents modèles de pose de pied lors d'épreuve sub maximale : courir à 18km/h sur tapis de course et mesurer l'élongation	Les résultats montrent que les différents modèles d'attaque de pied n'affectent pas les propriétés du tendon d'Achille : propriétés mécaniques, élastiques, et morphologiques. Le tendon des coureurs de longue distance est moins extensible que	Il n'y a pas de différence significative de la largeur, de l'élongation ni de la raideur du tendon d'Achille, mesurée entre les trois différents modèles de course. Perspective : clarifier les relations

	styles de pose du pied chez les coureurs de longues distances.	du tendon d'Achille et de l'aponévrose des gastrocnémiens avec une échographie. Les propriétés élastiques ainsi que la raideur et la largeur du tendon d'Achille sont mesurés sur trois groupes de coureurs (12 coureurs FFS, 12 coureurs MFS et 17 coureurs RFS).	ceux des sujets non entraînés. Les coureurs élités (longue distance) représentent un fort pourcentage d'attaque FFS et MFS : 60%	entre les différents modèles de course à pied et d'autres facteurs comme les propriétés mécanique de l'arche, sachant que 17% de l'énergie totale restituée est de l'énergie stockée par les éléments de l'arche.
Almonroeder T et al. 2013. [2]	L'objectif de cette étude était d'estimer la force du tendon d'Achille sur une population de coureuses au début de leur transition en course pieds nus avec une attaque talon ou non.	L'étude est réalisée sur une population de 19 femmes de 18 à 35 ans. Le protocole consistait à les faire courir sur un tapis de course de 20m en aller retour à 2 vitesses : 3,52 et 3, 89m/s. L'analyse cinétique et cinématique est réalisée avec une caméra en 3D, la force de réaction au sol est mesurée sur une plate forme de force. La force des gastrocnémiens et du soléaire est calculée par des capteurs en conditions de course. Les participantes courent pieds nus ou en minimaliste en choisissant leur propre style de pose de pied. L'enregistrement est effectué sur un minimum de 125 pas et sur un temps maximum de 10'.	11 participantes sur 19 ont choisi l'attaque talon en course pieds nus. Le pic de force du tendon d'Achille se produit tôt dans la phase d'appui chez les participantes ayant adoptées une attaque avant-pied ou médio-pied, ce qui contribue à augmenter de 15% la moyenne de la vitesse de charge du tendon d'Achille . Cependant la différence entre les groupes n'était pas statistiquement significatif ($p=0,06$, $ES=0,93$). Le GM et le soléaire produisent la majeure partie de la force pour chaque pas quelque soit la pose du pied. Le temps d'appui, la longueur des foulées et le nombre de pas par miles sont très similaires entre les groupes.	Les femmes avec une attaque non talon ont 4 fois plus de plaintes de tendinopathie d'Achille que les femmes avec une attaque talon. Cela suggère que l'attaque avant pied augmente la charge sur le tendon d'Achille et les proportions de tendinopathie.
Divert et al. 2005. [41]	Analyse biomécanique comparative entre les coureurs pieds nus et les coureurs chaussés.	Mesurer les paramètres cinétiques sur 35 sujets qui couraient 2 séries de 4 à 3,33m/s sur un tapis de course dans un ordre randomisé utilisant une course avec réception talon. La 1 ^{ère} série est courue pieds nus et la 2 ^{ème} série est courue chaussés. L'amplitude de la force verticale des pics passifs et actifs, l'impulsion verticale, le temps d'appui et d'envol et la longueur des foulées ont été mesurés sur un tapis de course muni d'un dynamomètre. L'activité musculaire du TA, des fibulaires, des GL et GM, et du soléaire a été enregistrée.	Les résultats montrent une différence significative entre les conditions chaussées et nus pieds. Les coureurs pieds nus ont un temps de contact et un temps de vol inférieur ($P<0,05$), un pic passif de la force de réaction au sol plus faible (1,48 contre 1,70 du poids du corps, $P<0,05$) et une pré-activation plus importante du triceps sural ($P<0,05$) comparé aux coureurs chaussés. Le taux de développement et l'amplitude de la force d'impact au sol sont significativement supérieurs chez les coureurs de type RFS (chaussés ou pieds nus).	La force d'impact, bien que diminuée par un amortissement artificiel, a un impact sur les structures musculo-squelettiques et la répétition de ces impacts mènent à différentes blessures au niveau des membres inférieurs. Le coureur pieds nus s'organise pour diminuer le pic d'impact afin de réduire le stress mécanique procuré pendant les pas répétitifs

Bibliographie

- [1] : **Paavola M, Jarvinen T.** Paratendinopathy. Foot Ankle Clin N AM. 2005 ; 10 : 279-292.
- [2] : **Almonroeder T, Willson JD, Kernozek TW.** The Effect of Foot Strike Pattern on Achilles Tendon Load During Running. Biomedical Engineering Society. 2013 ; 41 : 1758-1766.
- [3] : **Lopes AD, Hespanhol Junior LC, Yeung SS, Oliveira Pena Costa L.** What are the main running-related musculoskeletal injuries ? A Systematic Review. Sport Med. 2012 ; 42 (10) : 891-905.
- [4] : **Blondel R.** Pathologies traumatiques et métaboliques lors d'un ultra-marathon de montagne: l'exemple de l'UTMB 2009 Service de Médecine du Sport CHU Gabriel Montpied, Clermont-Ferrand France.
- [5] : **Lieberman DE.** What we can learn about running from barefoot running: an evolutionary medical perspective. Exerc. Sport Sci. Rev. 2012 ; 40 (2) : 63-72.
- [6] : **Dubois B.** (01 Août 2015). La clinique du coureur. Grand débat sur la technique de course. Teaser. <http://www.lacliniqueducoureur.com>. 14 mai 2015.
- [7] : **Pascal Prévost.** Le tendon à la loupe. Sport, Santé et Préparation Physique. 2003 ; 5 : 1-4.
- [8] : **Kamina P, Di Marino V, Francke JP, Santini JJ.** Anatomie Clinique. 4^{ème} Edition. Tome 1. Anatomie générale. Membres. Paris. Maloine. 2009. 473-476.
- [9] : **Volodalen.** (01 août 2015). Volodalen. Training. Formations. Editions. <http://www.volodalen.com/24blessures/blessures3.htm>. Janvier 2015.
- [10] : **Kaux JF, Forthomme B, Le Goff C, Crielaard JM, Croisier JL.** Current opinions on tendinopathy. Journal of sports Science and Medicine. 2011 ; 10 : 238-253.
- [11] : **Jarvinen TAH, Maffulli N.** Achilles Tendon Disorders: Etiology and Epidemiology. Foot Ankle Clin N Am. 2005 ; 10 : 255-266.
- [12] : **Lagniaux F.** Tendinopathies les classifications. Kinésithér Scient. 2013 ; 549 : 45-46.
- [13] : **Blanché L.** (29 septembre 2015). Incidence du chaussage sur les technopathies de la course à pied, débat autour du barefoot et du minimalisme : Avis de médecins généralistes, médecins du sport, kinésithérapeutes et podologues. <http://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01017252>. 2 juillet 2014.

- [14] : **Fédération Française d'Athlétisme.** (01 Août 2016). Athlé.fr. [http://www.athle.fr/Reglement/Reglementation Hors-Stade 2015.pdf](http://www.athle.fr/Reglement/Reglementation_Hors-Stade_2015.pdf). 17 juillet 2014.
- [15] : **Ziltener JL, Leal S, Grosclaude M.** Lésions du tendon d'Achille chez le «sportif» : étiologie et prise en charge. Rev Med Suisse. 2011 ; 7 : 595-603.
- [16] : **Tam N, Wilson JLA, Noakes TD, Tucker R.** Barefoot running : an evaluation of current hypothesis, future research and clinical applications. Br J Sports Med. 2013 ; 0 : 1-8.
- [17] : **Dufour M, Pillu M.** Biomécanique fonctionnelle. Membres - Tête – Tronc. Issy-les-Moulineau : Elsevier Masson. 2012 : 251-265.
- [18] : **Giandolini M.** Impact et contraintes musculo-tendineuses en course à pied : effets de la chaussure et de la technique de pose de pied. Kinesithér Scient. 2014 ; 560 : 15-19.
- [19] : **Brigaud F.** La course à pied. Posture, Biomécanique, Performance. Mondovi : Editions Désiris. 2014 : 41.
- [20] : **Nunns M, House C, Fallowfield J, Allsopp A et Dixon S.** Biomechanical characteristics of barefoot footstrike modalities. J Biomech. 2013 ; 46 : 2603-2610.
- [21] : **Lieberman D, Venkadesan M, Werbel W et al.** Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. Nature. 2010 ; 463: 531-535.
- [22] : **Haute Autorité de santé.** (18 octobre 2015). HAS haute autorité de santé. www.has-sante.fr/. 1 octobre 2015.
- [23] : **Legifrance** (15 janvier 2015). Legifrance.gouv.fr. Le service public de la diffusion du droit. Code de la santé publique. <https://www.legifrance.gouv.fr>. 31 décembre 2015.
- [24] : **Daoud AI, Geissler GJ, Wang F, Saretsky J, Douad YA and Lieberman DE.** Foot strike and injury rates in endurance runners: A retrospective study. Med Sci Sports Exerc. 2012 ; 44 : 1325-1334.
- [25] : **Esculier JF, Dubois B, Dionne CE, Leblond J, Roy JS.** consensus definition and rating scale for minimalist shoes. Journal of Foot and Ankle Research. 2015 ; 42 : 1-9.
- [26] : **Goss D, Gross MT.** Relationships among self-reported shoe type, footstrike pattern and injury incidence. The U.S. Army Medical Department Journal. 2012 ; 8 (12) : 25-30.
- [27] : **Hollander K, Argubi-Wollesen A, Reer R, Zech A.** Comparison of Minimalist Footwear Strategies for Simulating Barefoot Running: A Randomized Crossover Study. Plos One. 2015 ; 10 (5) : 1-11.

- [28] : **Giandolini M, Pavailier S, Samozinoa P, Morinc JB, Horvais N.** Foot strike pattern and impact continuous measurements during a trail running race: proof of concept in a world-class athlete. *Footwear Science*. 2015 ; 7 (2) : 127-137.
- [29] : **Ryan M, Elashi M, Newsham-West R, Taunton J.** Examining injury risk and pain perception in runners using minimalist footwear. *Br J Sports Med*. 2013 ; 0 : 1–6.
- [30] : **Shih Y, Lin KL, Shiang T-Y.** Is the foot striking pattern more important than barefoot or shod conditions in running? *Gait and Posture*. 2013; 38: 490-494.
- [31] : **Yong J, Slider A, Delp S.** Différence in muscle activity between natural forefoot and rearfoot strikers during running. *Journal of Biomechanics*. 2014 ; 47 : 3593-3597.
- [32] : **Stecco C, Corradin M, Macchi V et al.** Plantar fascia anatomy and its relationship with Achilles tendon and paratenon. *J. Anat.* 2013 ; 10 : 1-12.
- [33] : **Pelletier-Galarneau M, Martineau P, Gaudreault M, Pham X.** Review of running injuries of the foot and ankle: clinical presentation and SPECT-CT imaging patterns. *Am J Nucl Med Mol Imaging*. 2015 ; 5 (4) : 305-316.
- [34] : **Millet G.** Can Neuromuscular Fatigue Explain Running Strategies and Performance in Ultra-Marathons? The flush Model. *Sports Med*. 2011 ; 41 (6) : 489-506.
- [35] : **Liebl D, Hamill J, Willwacher S, Bruggemann GP.** Ankle plantarflexion strength in rearfoot and forefoot runners : A novel clusteranalytic approach. *Hum Mov Sci*. 2014 : 1-10.
- [36] : **Yu J.** Comparison of Lower Limb Muscle Activity during Eccentric and Concentric Exercises in Runners with Achilles Tendinopathy. *J. Phys. Ther. Sci*. 2014 ; 26 : 1351–1353.
- [37] : **Manolova A.** (22 septembre 2015). Relation entre la pose du pied en course à pied et la fréquence des blessures. <http://www.sci-sport.com/articles/042.php>. 17 Juillet 2012
- [38] : **Giandolini M, Arnal PJ, Millet GY et al.** Impact reduction during running: efficiency of simple acute interventions in recreational runners. *Eur J Appl Physiol*. 2013 ; 113 : 599-609.
- [39] : **Kulmala JP et al.** Forefoot strikers exhibit lower running-induced knee loading than rearfoot strikers. *Med Sci Sports Exerc*. 2013 ; 45 (12) : 2306-13.
- [40] : **Kubo K, Miyazakib D, Tanakab S, Shimojub S, Tsunoda N.** Relationship between Achilles tendon properties and foot strike patterns in long-distance runners. *Journal of Sports Sciences*. 2015 ; 33 (7) : 665-669.

[41] : **Divert C, Mornieux G, Baur H, Mayer F, Belli A.** Mechanical comparison of Barefoot and shod running. Int J Sports Med. 2005 ; 26 : 593-598.

Littératures grises utilisées :

- Joonekin S. La place du Masseuse-Kinesithérapeute est-elle toujours adaptée dans la récupération musculaire du sportif ? IFMK Dijon. 2015
- Cussac C. Les courbatures : Rôle préventif du masseur-kinesithérapeute. IFMK Dijon. 2015

Résumé

La démocratisation de la course pieds nus et l'avènement des chaussures minimalistes se sont largement développés ces dernières années. Cette approche de la course à pied prône un meilleur travail du pied et la limitation du pic d'impact afin d'améliorer les performances et diminuer les blessures ostéo-articulaires. Cette façon de courir induit à 85% une pose de pied avant-pied mettant largement en contrainte le système myo-tendineux du pied, de la cheville et le tendon d'Achille.

La tendinopathie d'Achille est une pathologie de sur-sollicitation récurrente et trop fréquente chez les trailers. Je me suis alors demandée, comment le Masseuse-Kinesithérapeute pourrait, en amont, limiter cette pathologie souvent longue à soigner. Cette réflexion a débouché sur ce mémoire qui traite de l'influence de la pose de pied sur les tendinopathies d'Achille. La meilleure compréhension de ce mécanisme pourrait constituer un outil de prévention dans la prise en charge de nos patients trailers, afin de diminuer la survenue mais aussi la récurrence de cette pathologie.

Mots Clés :

Tendinopathie d'Achille, pose de pied, course à pied, tendon d'Achille.

Abstract

Barefoot running democratization and running footwear happening developed these last few years. This running style shows a better foot work and it reduces the impact peak in order to improve the performance and decrease musculoskeletal injuries. This running style pattern induces 85% forefoot strike pattern to compel the foot, the ankle and Achilles' tendon.

The Achilles tendinopathy is a recurrent and too common overuse injuries among runners. I then wondered how the physiotherapist could limit this running injury which takes so long to cure. This reflexion led to this research paper which deals with the foot strike influence on the Achilles tendinopathy. The best comprehension of this mechanism could constitute a preventive way in the management of our runner patients in order to reduce the occurrence but also the recurrence pathology.

Key Words :

Achilles tendynopathy, foot strike, running, Achilles tendon.