



**HAL**  
open science

# La pronation du pied dans le risque de blessures de surutilisation chez le coureur à pied

Léa Scueil

► **To cite this version:**

Léa Scueil. La pronation du pied dans le risque de blessures de surutilisation chez le coureur à pied. Sciences du Vivant [q-bio]. 2023. dumas-04266384

**HAL Id: dumas-04266384**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04266384v1>**

Submitted on 31 Oct 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ  
ÉCOLE DES SCIENCES DE LA RÉADAPTATION  
FORMATION EN MASSO-KINÉSITHÉRAPIE

**LA PRONATION DU PIED  
DANS LE RISQUE DE BLESSURES DE  
SURUTILISATION  
CHEZ LE COUREUR A PIED**

**SCUEIL Léa**  
**Directeur de mémoire : M. ORTS DAVID**

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier mon directeur de mémoire, Monsieur David Orts, pour m'avoir conseillé et aiguillé durant ces mois de recherches.

Je remercie les différents kinésithérapeutes que j'ai pu rencontrer lors de mes stages, qui m'ont enseigné leurs propres pratiques et apporté des connaissances dans différentes spécialités.

Je remercie mes ami(e)s rencontré(e)s dès ma première rentrée à l'IFMK, avec qui j'ai pu partager tous les souvenirs de ces quatre années de vie scolaire et tous les autres bons moments. Sans eux ces années n'auraient pas eu la même saveur.

Merci à mes collègues du groupe 7 pour la bonne humeur et les rires, le fait d'avoir appris et d'apprendre ensemble a été un réel plaisir.

Et enfin un grand merci à mon père, ma mère, ma sœur et Christian pour leur amour, leur optimisme ainsi que leur aide qui m'ont facilité le chemin vers le métier qui me passionne.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1	CADRE CONCEPTUEL	1
1.2	BIOMECHANIQUE DE LA COURSE A PIED	2
1.2.1	Les différentes étapes	2
1.2.2	Les forces de réaction au sol	4
1.2.3	Types de foulées	5
1.2.4	Pattern aérien ou terrien	6
1.3	LE PIED DU COUREUR	8
1.3.1	Le complexe articulaire sous-talien	8
1.3.2	Axes et mouvements de l'articulation sub-talaire	10
1.3.3	La pronation du pied et ses conséquences	11
1.3.4	Système de maintien en lien avec la pronation du pied	13
1.4	LES BLESSURES EN COURSE A PIED	16
1.4.1	Physiopathologie des blessures aiguës	16
1.4.2	Physiopathologie des blessures de surutilisation	16
1.4.3	Pathologies courantes	17
<b>2</b>	<b>PROBLEMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHESES</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>METHODE</b>	<b>19</b>
3.1	CRITERES D'ELIGIBILITES DES ETUDES SELECTIONNEES	19
3.1.1	Schéma d'étude	19
3.1.2	Critères d'inclusion et critères d'exclusion des études	19
3.1.3	Population	20
3.1.4	Facteurs de risque	20
3.1.5	Critère de jugement	20
3.2	METHODE DE RECHERCHE	20
3.2.1	Modèle PICO et équation de recherche	20
3.2.2	Stratégie de recherche	21
3.3	METHODE D'EXTRACTION ET ANALYSE DES DONNEES	22
3.3.1	Analyse de la qualité méthodologique des études incluses	22
3.3.2	Extraction des données récoltées	23
3.3.3	Quantification des résultats	23
3.3.4	Synthèse des résultats	24
<b>4</b>	<b>RESULTATS</b>	<b>25</b>
4.1	DESCRIPTION DES ETUDES	25
4.1.1	Diagramme de flux	25
4.1.2	Articles exclus	26
4.1.3	Articles inclus	27
4.1.4	Caractéristiques des études incluses	28
4.2	BIAIS RELATIFS AUX ARTICLES INCLUS	31
4.3	EFFETS DES FACTEURS DE RISQUE SUR LE CRITERE DE JUGEMENT	37
<b>5</b>	<b>DISCUSSION</b>	<b>41</b>
5.1	ANALYSE DE L'HETEROGENEITE	41
5.2	ANALYSE DES RESULTATS	44
5.2.1	Posture statique en pronation du pied comme facteur de risque	44
5.2.2	Paramètres dynamiques de la pronation du pied comme facteurs de risque	46
5.2.3	Limites des résultats	52

5.3	APPLICABILITE DES RESULTATS EN PRATIQUE CLINIQUE .....	53
5.4	QUALITES DE PREUVES.....	56
5.5	LIMITES ET BIAIS POTENTIELS DE LA REVUE.....	57
6	CONCLUSION.....	59
7	BIBLIOGRAPHIE .....	60
8	ANNEXES.....	66



# 1 INTRODUCTION

## 1.1 Cadre conceptuel

*« La course à pied constitue pour l'homme le moyen le plus rapide pour se déplacer par une succession de foulées bondissantes à partir d'appuis pédestres effectués alternativement sur chaque pied. Elle est caractérisée, contrairement à la marche, par une projection aérienne du corps en translation, consécutive à chacune des phases d'appui unipodal, et ne comporte donc pas de phase de double appui. ».* [1]

Cette définition appuie le fait que L'Homme ait commencé à courir instinctivement pour se nourrir et se protéger car c'était la manière la plus rapide de se déplacer. Puis de nos jours, l'Homme s'est mis à courir par pur plaisir ou dans le but de se maintenir dans une bonne condition physique jusqu'à se challenger dans une optique de performance, de compétitions, de dépassement de soi. Aujourd'hui, l'être humain arrive à courir toujours plus vite et toujours plus longtemps comme le montre le dernier record du monde du marathon établi par Eliud Kipchoge en 2 heures et 1 minute pour une distance de 42,195 kilomètres.

Un athlète médaillé olympique des jeux de 1936, Jesse Owens a énoncé : *« J'ai toujours aimé courir, c'est quelque chose que vous pouvez faire par vous-même, et par vos propres moyens. Vous pouvez aller dans n'importe quelle direction, vite ou lentement, en luttant contre le vent si vous en avez envie [...] ».*

Nous pourrions penser que cet état d'esprit s'est généralisé au fil des générations car l'évolution et la pratique de la course à pied ont connu un essor fulgurant notamment depuis le début des années 2000 qui comptaient, à l'époque, 6 millions de pratiquants. D'après une étude réalisée en 2013 par la Fédération Française d'Athlétisme (FFA) et Sportlab, la France comptait 8,5 millions de coureurs, soit 19% de la population.<sup>1</sup> Presque dix ans et un confinement strict plus tard, ce sont près de 13 millions de coureurs qui arpentent les villes, les pistes ou les chemins en France d'après une étude réalisée par Sport Heroes et l'UNION sport et cycle.[2]

Les faits énoncés ci-dessus abordent le fait que la course à pied soit donc devenue petit à petit le deuxième sport le plus pratiqué à travers le monde de par sa facilité d'accès, du relatif faible coût de son équipement, ainsi que de ses bénéfices sur la santé. [3] Ses vertus sur le maintien du bien-être physique et psychologique sont déjà bien connues. En effet, le fait de courir régulièrement diminue les risques de décès par maladies chroniques comme les maladies cardio-vasculaires ou respiratoires. [4]

D'autres études démontrent que la pratique de la course à pied joue un rôle bénéfique et a une implication positive sur la santé mentale.[5] En effet, la population est en recherche constante d'évasion dû au stress quotidien amplifié par l'impact psychologique engendré par la crise sanitaire ainsi que la dégradation des conditions de vie actuelles et certains la retrouvent dans la course à pied.

Cependant malgré son apparence simpliste, la course à pied peut s'avérer à risque pour ceux qui la pratiquent. Les individus qui se lancent dans la course à pied ne sont pas toujours bien informés des risques encourus lorsqu'ils commencent à la pratiquer, notamment sur les éléments essentiels à sa pratique et sur les conseils importants à connaître pour éviter de s'exposer aux risques de blessures.

---

<sup>1</sup> <https://www.athle.fr/asp.net/main.news/news.aspx?newsid=11782>

En effet la course à pied est soumise à de nombreux facteurs de risques de blessures s'ils ne sont pas contrôlés. Elle impose de fortes contraintes au corps humain et notamment aux membres inférieurs dont le pied, qui a un rôle clef lors de la locomotion. Si les athlètes n'ont pas conscience de leurs facteurs de risque intrinsèques, notamment au niveau de leur anatomie ou leur biomécanique de course lors du contact initial au sol, cela peut impacter leur système musculosquelettique. Les différents mouvements articulaires du pied lui confèrent la possibilité de passer d'un système rigide capable de se propulser à un système souple permettant d'amortir le contact au sol.

Dans ce cadre-là, nous cibleront les paramètres statiques et cinématiques du pied et notamment au niveau du mouvement de pronation et s'ils représentent des facteurs de risques de blessures chez le coureur à pied. Afin de mieux appréhender le mouvement de pronation au niveau de l'articulation subtalaire et de ses répercussions sur le reste du système musculosquelettique, il faut d'abord comprendre la biomécanique des membres inférieurs durant la course à pied, repérer à quel moment les mouvements se produisent et contre quelles forces ils agissent.

## 1.2 Biomécanique de la course à pied

### 1.2.1 Les différentes étapes

A l'opposé de la marche, la course à pied ne comporte pas de phase de double appui, les membres inférieurs se retrouvent l'un après l'autre, propulsés au-dessus du sol. C'est une succession de cycles qui démarrent lorsque le pied du coureur touche le sol et se termine quand celui-ci se retrouve à nouveau sur le sol. Ils se décomposent en deux foulées se définissant comme l'espace parcouru entre l'alternance de l'appui du pied droit puis de l'appui du pied gauche.[1]

Il est fonctionnellement impossible de séparer les étapes biomécaniques de la course à pied, ainsi que les mouvements de chacune des articulations et la fonction des muscles de manière analytique car ces chaînes agissent en même temps. Seulement, afin de mieux comprendre ces mécanismes dont fait partie la pronation du pied, nous allons découper ces phases en différentes étapes.

Nous pouvons observer deux phases se succédant lors d'un cycle [6] :

- la phase de contact,
- la phase de suspension.

Concernant la **phase de contact**, elle se décompose elle-même en plusieurs étapes :

#### ➤ ETAPE D'AMORTISSEMENT

L'amortissement lors de la course est la phase de contact initial du pied au sol jusqu'au passage du bassin à l'aplomb du pied. Il s'agit d'une étape primordiale car elle conditionne l'absorption des contraintes subies.[7]

Durant la phase d'amortissement, le pied arrive sur le sol en position d'inversion c'est-à-dire en légère flexion plantaire avec une supination du pied au niveau de l'arrière-pied et de l'articulation subtalaire.

Au niveau des articulations sus-jacentes, il se produit une rotation interne au niveau du tibia et dans le même temps l'articulation subtalaire va commencer à subir une légère éversion passive causée par la gravité. Cette dernière correspondant à une flexion dorsale de la cheville, une pronation et



abduction du pied. C'est à ce moment-là que commence l'absorption du choc des forces de réactions au sol. L'énergie est emmagasinée dans les muscles lorsque la jambe se fléchit. [7]

La pronation, lors de l'éversion du pied, va permettre une absorption maximale des forces de réactions au sol ainsi que l'adaptation des différentes articulations face aux variations du terrain lors de la phase de soutien.[7]

Cette étape équivaut à freiner l'appui au sol avec l'aide de différents muscles et leurs actions. Elle peut être réalisée selon les différents patterns qui seront détaillés par la suite.

➤ **ETAPE DE SOUTIEN**

La phase qui suit l'amortissement correspond au moment où le centre de gravité du coureur est aligné à l'aplomb du pied pour stabiliser au maximum le corps par la contraction isométrique des muscles et ce afin de lutter contre la pesanteur. La stabilisation de l'appui et l'absorption de l'énergie vont donc être les actions principales lors de cette phase.[1]

Le poids du corps va être réparti sur la jambe en appui en projection de la mortaise tibio-fibulaire, juste au-dessus de l'articulation subtalaire. Cette dernière recevra la plus grande force de gravité à ce moment-là. Il se produit une **augmentation du mouvement d'éversion du pied** enclenché lors de l'étape d'amortissement. En effet, le pied va continuer à se dérouler vers l'extérieur afin de déverrouiller les articulations nécessaires à sa mobilité pour répartir les forces subies aux articulations sus-jacentes lors de l'impact. [8]

C'est donc à cette étape que va se produire le **maximum de pronation du pied**. L'articulation doit absorber de manière optimale les forces de réactions au sol pendant que la jambe opposée réalise sa phase oscillante. Par la suite, l'avancée de la jambe oscillante induit une rotation au niveau du bassin. Elle engendre cette fois-ci une rotation externe du fémur et du tibia qui vont provoquer le mouvement d'inversion du pied.[9]

Ce mouvement d'inversion décrit l'adduction et la supination du pied couplées à une flexion plantaire, il est réalisé par le triceps sural et les muscles inverseurs. Il va permettre une rigidité, une robustesse au pied lors du décollage du talon en verrouillant cette fois-ci toutes les articulations du pied afin de préparer la propulsion du corps et de terminer la phase de soutien en entamant la phase de propulsion.[9]

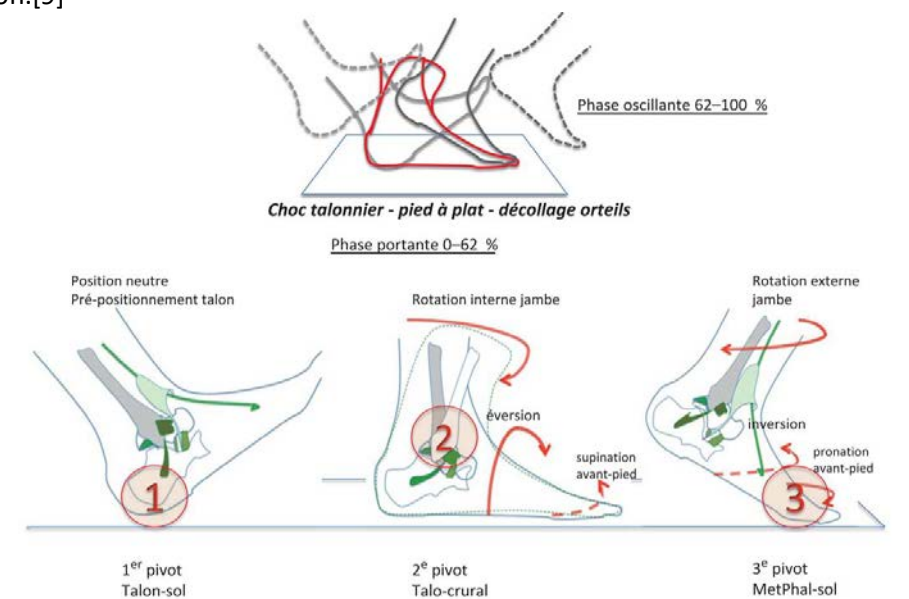


Figure 1 Schématisation de la phase d'appui - Livre "La cheville instable"[8]

## ➤ ETAPE DE PROPULSION

L'étape de « propulsion » commence au moment où le centre de gravité dépasse l'aplomb du pied jusqu'à ce que les orteils décollent du sol. L'énergie absorbée par les forces appliquées au sol et par le sol durant l'étape d'amortissement est restituée lorsque la jambe se détend afin que les muscles qui se contractent, propulsent le corps vers l'avant.[1]

Afin de pouvoir dérouler le pas et développer l'impulsion, l'extension de la hanche et du genou, enclenchées par une rotation externe du fémur et du tibia, sont primordiales.

Dès lors que le corps va se propulser vers l'avant, le talon va commencer à se détacher du sol. Les muscles fléchisseurs du pied se contractent de manière concentrique ainsi que tous les muscles qui stabiliseront la cheville et le pied à ce moment-là. Ils travaillent en synergie afin de donner au membre inférieur toute l'énergie nécessaire pour se propulser et décoller entièrement le corps.[1] Une fois la fin de cette phase terminée, le pied décolle entièrement du sol et la phase de suspension peut commencer pour ce membre-là et celle de la phase d'appui pour le membre opposé.

Concernant la **phase de suspension** :

Elle commence lorsque les deux pieds ne touchent plus le sol et se termine lorsque le coureur reprend appui et qu'un nouveau cycle commence. C'est le résultat des étapes précédentes permettant au coureur de réaliser des ajustements segmentaires afin de préparer l'étape d'amortissement du prochain cycle.[1]

Chaque coureur a sa propre manière de courir. Il n'existe pas une technique de course précise plus performante même s'il se peut que certains facteurs la rendent plus ou moins efficace. Le pied est le premier lien entre le sportif et le sol. Sa biomécanique est complexe et se doit de répondre à plusieurs assujettis dont deux fondamentaux dans la pratique de la course à pied : **la stabilisation et la propulsion**.[10]

### 1.2.2 Les forces de réaction au sol

Pour bien comprendre l'étiologie des blessures en course à pied, il est important de définir les conditions d'entrée subies par le système musculosquelettique à chaque fois que le pied touche le sol pendant le cycle de course.

Lors du contact initial, les forces de réactions au sol apparaissent et imposent des contraintes dont les structures articulaires et musculaires du pied vont être les premières à absorber. La force subie va se propager au fur et à mesure aux articulations sus-jacentes. Il va falloir résister contre l'affaissement du membre inférieur.[7]

D'après la troisième loi de Newton, il se produit une résultante de forces entre le coureur et le sol. En effet lorsque le poids du corps exerce une force sur le sol pendant la course à pied, le sol exerce en retour une Force de Réaction au Sol (FRS) ou « Ground Force Reaction (GFR) » opposée sur le corps qui est en contact avec lui.

La FRS possède plusieurs composantes [11]:

- Une composante verticale vers le haut qui s'oppose au mouvement du corps vers le bas et qui va servir à la propulsion du corps. C'est la plus grande composante de la FRS et la plus étudiée

actuellement. Elle peut atteindre jusqu'à 3 voire 5 fois le poids corporel. Cette composante est formée de deux pics :

Un pic passif qui décrit le moment de collision du pied avec le sol et un pic actif qui est la force donnée par le pied sur le sol lors de l'impulsion.[11] L'intensité de ces mouvements influencent les charges subies dans les articulations et les muscles des membres inférieurs.

- Une composante antéro-postérieure qui est la force horizontale qu'exerce le sol sur le pied. Elle aussi sera composée de deux pics, elle sera donc frénatrice lors du contact du pied au sol jusqu'au milieu de l'appui et accélératrice lors de la fin de l'appui pour propulser le corps.[11]
- Une composante médio-latérale qui est considérée comme minime et qui entraîne des mouvements latéraux du corps lors de la course.

Une mauvaise dynamique du pied ou posture inadéquate peuvent alors engendrer une mauvaise répartition et transformation de la FRS. L'absorption de cette force et notamment de la force de réaction verticale doit être faite par un système musculosquelettique fonctionnel et équilibré pour éviter la sursollicitation au niveau articulaire et musculaire et donc la survenue de blessures notamment de surcharge.

Nous venons de voir que lors de la phase d'appui au sol, l'articulation subtalaire réalise des mouvements au niveau de l'arrière-pied qui sont responsables de l'absorption adéquates des FRS. Mais il existe différentes de façon de réaliser ces étapes et de faire face à ces forces selon les foulées lors de la course à pied.

### 1.2.3 Types de foulées

Dans les années 90, l'approche ActionTypes®, développée par Ralph Hippolyte et Bertrand Theraulaz, reprend les travaux du neuroscientifique Jonathan Niednagel et du kinésithérapeute Raymond Sohier [12]. Ils retrouvent un lien entre les préférences cognitives des individus et l'influence qu'elles peuvent avoir sur leurs préférences motrices. Ils insistent sur le fait que la réalisation d'un geste sportif est propre à chaque individu et que chacun d'entre eux possède des schémas de préférences dans cette réalisation. Chaque coureur suit une initiation naturelle préétablie par leur système nerveux pour réaliser un mouvement d'une manière plutôt qu'une autre afin d'en tirer la meilleure exécution.

Pendant la course à pied qui est un sport à impacts répétitifs imposant de nombreuses contraintes notamment sur les membres inférieurs, l'acquisition de ces préférences peut conditionner la qualité de l'amortissement. Elle peut également influencer la coordination des gestes et l'équilibre du coureur lors de la foulée.

On peut décrire trois différents types de foulées préférentielles[13] :

- La foulée pronatrice : l'appui se fera majoritairement sur le bord interne du pied, on remarquera un affaissement de l'arche plantaire médiale vers l'extérieur. Le temps de pronation de l'arrière pied sera plus marqué et plus long.[1]
- La foulée supinatrice : l'appui se fait majoritairement sur le bord externe du pied, il y aura un creusement plus marqué au niveau de l'arche plantaire médiale et un temps de pronation diminué lors de l'appui.[1]

- La foulée neutre : les appuis se font de manière équilibrée entre les mouvements de pronation et supination du pied.

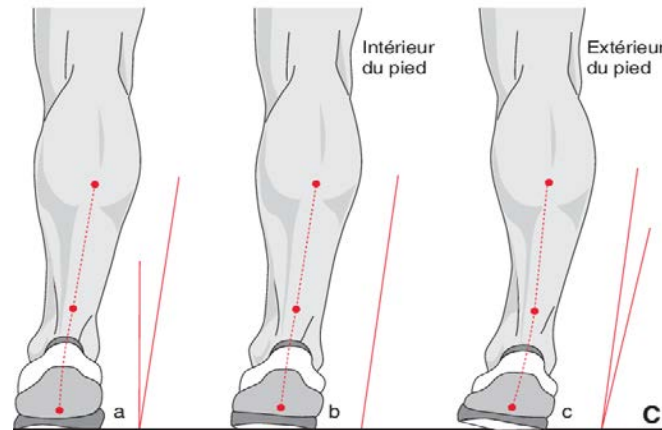


Figure 2 Différents types de foulées : a. Pronatrice b. Neutre c. Supinatrice [1]

Ces foulées « pronatrices » peuvent être influencées selon les différents patterns de course individuels. Elles concernent particulièrement les coureurs ayant des préférences motrices avec une attaque de pas par le talon.

#### 1.2.4 Pattern aérien ou terrien

Dans le cadre des différents schémas moteurs préférentiels, deux kinésithérapeutes Cyrille Gindre et Thibault Lussianna ont également initié leurs travaux dans cette direction.[14] Ils ont fait ressortir deux grandes catégories de coureurs à savoir le modèle « aérien » et le modèle « terrien ». Plusieurs études montrent que ces deux classifications utilisent des schémas moteurs et des paramètres biomécaniques de course différents pour optimiser l'efficacité de leur course et diminuer la fatigabilité des cycles.[14] Ces classifications sont évidemment non-exhaustives car chaque coureur possède son propre pattern ainsi un coureur pourra utiliser des caractéristiques d'un coureur terrien et des caractéristiques d'un coureur aérien.

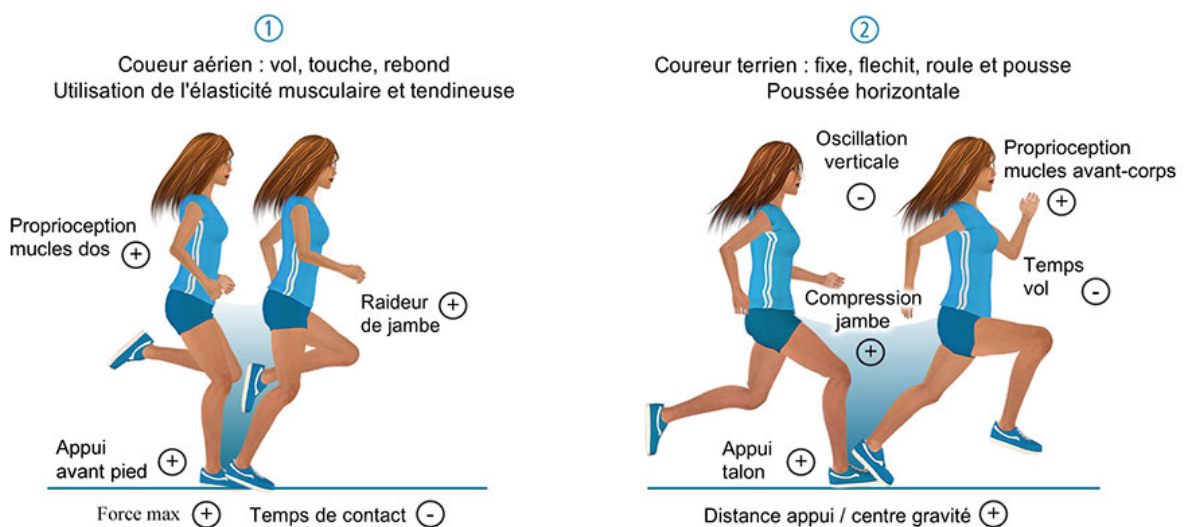


Figure 3 Pattern Aérien et Pattern Terrien[14]

Dans le modèle aérien, l'activité motrice est engagée par les épaules, le bassin est plutôt antéversé durant la course. Les foulées sont raccourcies et l'impact du pied se fait à la verticale du centre de gravité avec l'avant du pied ou le médio-pied.[14] Ainsi, le pied ne se déroule pas complètement et le coureur « rebondi » directement après l'appui. Les forces de réactions subies vont se répartir davantage aux os du tarse antérieur et le pic passif de la force de réaction au sol lors de l'appui sera moins prononcé contrairement au modèle terrien.[15]

Dans le modèle terrien, l'activité motrice est engagée par le bassin, ce dernier est en position rétroversé. Les foulées sont plus longues et l'impact au sol se fait en avant du centre de gravité et par le talon. Le pied va se dérouler entièrement et les forces de réaction verticales vont être appliquées directement au niveau du calcanéum et engendrer plus de forces transmises à ce niveau-là et aux articulations supérieures.[15] L'articulation subtalaire au niveau du pied du coureur avec un pattern terrien va donc subir un mouvement d'éversion et donc une pronation de l'arrière-pied plus importante que le coureur avec un pattern aérien. Ce dernier aura un temps d'appui au sol moindre et une attaque par l'avant du pied qui diminuera donc ce phénomène d'éversion dans sa course.[16]

Il semble donc intéressant de se pencher sur les conséquences possibles de la posture ou des mouvements d'éversion du pied pendant la course.

De nombreux facteurs rentrent en jeu dans le risque de blessures liées à la pratique de la course à pied et les forces de réactions au sol vont être réparties différemment selon les préférences motrices de chacun. Nous allons nous questionner particulièrement sur le rôle de la pronation du complexe articulaire sous talien chez le coureur à pied. Pour cela nous allons étudier les articulations mise en jeu dans ce phénomène de pronation et ses complexités.

## 1.3 Le pied du coureur

Le pied, lié à l'articulation de la cheville, est l'extrémité distale du membre inférieur. Il permet de supporter le poids du corps en position debout et permet la locomotion. Il doit répondre à trois fonctions essentielles et notamment lors de la course : **équilibre, amorti et propulsion**. [10]

Il est composé de 26 os formant de nombreuses articulations complexes. Il dispose d'une structure architecturale voûtée : une multitude d'arches transversales et deux arches longitudinales. L'arche longitudinale médiale est constituée de l'étendue entre le calcanéum et la tête des trois premiers métatarses. La clé de voûte de cette arche est la surface articulaire supérieure du talus. [17] Cette arche fait intervenir de nombreuses articulations qui lui confèrent une grande élasticité. Elle permet une meilleure restitution de l'énergie absorbée lors de l'impact au sol. Cette élasticité est liée à une hauteur plus importante comparée à l'arche longitudinale latérale. C'est par la déformation de celle-ci pendant la course que les forces de réaction verticales absorbées lors de l'impact sont retransmises et qui permettent d'enclencher la phase de propulsion. [17]

Dans cette revue de littérature c'est la posture et le mouvement de l'arrière-pied couplés au médio-pied et notamment la pronation au niveau du complexe articulaire sous-talien qui va nous intéresser. Ils ne pourront bien évidemment pas être isolés par rapport aux mouvements des autres articulations. Nous les décrivons donc et ce qu'ils peuvent engendrer dans les articulations adjacentes.

### 1.3.1 Le complexe articulaire sous-talien

Les représentations de l'articulation subtalaire sont complexes, les données de la littérature divergent et différentes descriptions y sont énoncées. Sur le plan fonctionnel et clinique, le complexe articulaire sous-talien (AST) est constitué de plusieurs entités dont l'articulation Talo-Calcanéenne (TC), l'articulation Talo-Naviculaire (TN) et l'articulation Calcanéo- Cuboïdienne (CC). [18]

#### Articulation talo-calcanéenne

L'articulation TC ou « subtalaire » se situe au niveau de l'arrière-pied et se constitue de deux articulations distinctes : l'articulation TC antérieure et postérieure. Elles sont séparées l'une de l'autre par un canal osseux, le sinus du tarse, qui est un conduit en forme d'entonnoir avec un axe allant de dedans en dehors et d'arrière en avant. Il contient des nerfs, des vaisseaux sanguins ainsi que des éléments de soutien (ligaments, capsules articulaires...). [18]

La surface articulaire antérieure du calcanéum comprend généralement avec elle une surface articulaire moyenne, elles peuvent être reliées ou discontinues. Elles se situent au niveau du sustentaculum tali et de l'apophyse antérieure de la tête du calcanéum et sont concaves. Elles sont destinées aux surfaces articulaires convexes de la face inférieure du talus. Les formes de ces surfaces peuvent être variables selon chaque individu et peuvent conditionner l'amplitude possible des mouvements. Elles partagent leur capsule articulaire avec l'articulation talo-naviculaire. [19]

La surface articulaire postérieure située sur la face supérieure convexe du calcanéum au niveau du thalamus s'emboîte avec la surface articulaire concave du talus. L'articulation est plutôt de forme rectangulaire dans sa partie postérieure et ovale dans sa partie antérieure. La partie postérieure possède sa propre capsule articulaire.

## Articulation talo-naviculaire

L'articulation talo-naviculaire est particulière car elle se joint à la fois à l'articulation calcanéocuboïdienne pour former l'articulation transverse du tarse ou articulation « de Chopart » qui est la jonction entre l'arrière pied et le médio-pied.

D'autre part elle est indissociable de l'articulation TC antérieure et moyenne et elle contribue également aux mouvements de pronation/supination du pied. [20]

Ces deux articulations sont cliniquement reliées afin de mieux comprendre les mouvements tridimensionnels du pied. On les nomme ensemble la « Coxa Pedis » car elles sont semblables à l'articulation coxo-fémorale. En effet, l'anatomiste et chirurgien Scarpa retrouve une analogie entre les mouvements de la tête fémorale dans l'acétabulum de l'os coxal et entre la tête du talus qui s'articule dans les surfaces articulaires du calcanéum et du naviculaire.[21]

Concernant l'articulation, la face postérieure du naviculaire, qui a une forme concave et arrondie, répond à la tête du talus. Elle vient s'encaster dans cette surface articulaire également soutenue par la partie cartilagineuse du ligament calcanéonaviculaire plantaire et par la partie antérieure du calcanéum.

## Unités fonctionnelles du pied

Les articulations TC antérieure, moyenne et TN sont indissociables les unes des autres. Elles forment avec les articulations TC postérieure et moyenne ce qu'on appelle le complexe articulaire sous-talien. Ce complexe fait partie du **bloc calcanéopédieux (BCP)**, qui réunit l'ensemble du pied excepté le talus.[22]

Ce dernier os est un os principalement recouvert de surface articulaire sans insertion musculaire. Il se mobilise donc avec l'aide des structures péri-talaires et il est notamment solidaire de la mortaise tibio-fibulaire formant ensemble l'**unité talo-tibio-fibulaire (UTTF)**. [22]

**Le complexe articulaire sous talien est le centre des mouvements qui ont lieu entre le BCP et l'UTTF.**

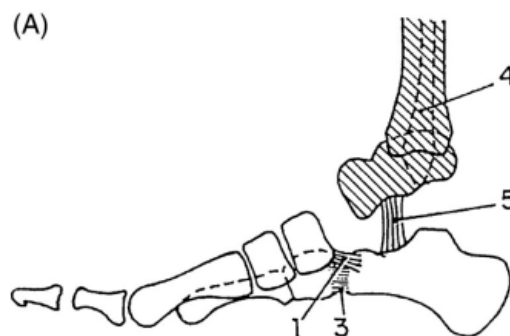


Figure 4 Unité talo-tibio-fibulaire (UTTF) et le bloc calcanéopédieux (BCP) [22]

### 1.3.2 Axes et mouvements de l'articulation sub-talaire

#### **En décharge :**

Les mouvements de l'articulation subtalaire en décharge se définissent facilement. Ils se font autour d'un axe unique appelé l'axe de Henké, qui est un axe de rotation oblique qui suit le trajet du sinus du tarse sous un angle de  $42^\circ$  dans le plan sagittal et de  $23^\circ$  dans le plan horizontal. La surface articulaire antérieure se déplace en sens inverse autour de celui-ci par rapport à la surface postérieure. [23] Selon Faraboeuf, en décharge, le calcanéum « vire, tangué et roule » sous l'UTTF par l'intermédiaire du talus fixe.

Les deux mouvements tridimensionnels possibles sont :

- L'inversion, qui est le fait de porter la plante du pied vers l'intérieur par rapport à l'axe du corps et qui est une combinaison d'un mouvement de flexion plantaire, d'adduction et de supination du pied.[24]
- L'éversion, qui est le fait de porter la plante du pied vers l'extérieur de l'axe du corps et qui est la combinaison d'une flexion dorsale, d'abduction et de pronation du pied.[24]

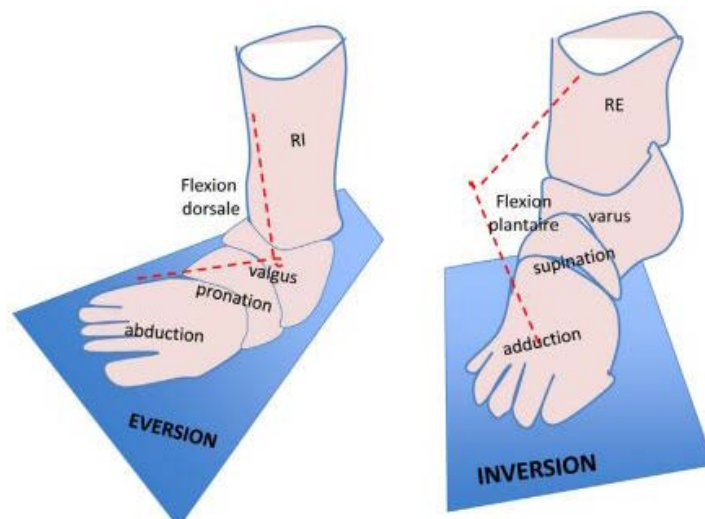


Figure 5. Mouvements d'éversion et d'inversion du pied [10]

#### **En charge :**

Lors de la mise en charge, les mouvements du pied se font selon la quantité et la répartition de la force de réaction du sol. Les mouvements globaux définis selon un axe de rotation fixe et unique ne sont donc plus valables. Il faut concevoir le mouvement du complexe sous talien comme de multiples faisceaux d'axes mobiles. [25]

Dans la littérature, Close et Inmann ont tenté de simplifier la biomécanique de l'articulation sous-talienne afin d'en améliorer la compréhension de sa biomécanique pendant la marche ou la course.[26]

Ils schématisent le pied et l'axe jambier comme deux planches de bois perpendiculaires l'une à l'autre et reliées par un pivot qui peut s'incliner latéralement jusqu'à  $45^\circ$ . Lorsque l'on déplace une des deux planches en rotation, l'autre la subit automatiquement. En position debout, la rotation



externe de la jambe est une rotation de l'ensemble de l'UTTF au-dessus du BCP. Le pied et, par conséquent, le BCP est fixé au sol. Pour que le talus tourne vers l'extérieur, le BCP doit tourner vers l'intérieur par inversion, c'est-à-dire flexion plantaire, supination, adduction du pied. Et inversement, lors de l'éversion du pied, cela entraîne une rotation interne du segment jambier.

Cette comparaison nous aide à comprendre comment se produisent les rotations latérale et médiale de la jambe lorsque le pied se trouve en supination ou en pronation respectivement.[22] Ces transferts de mouvements sont primordiaux lors du schéma de marche et de course à pied. Ils se produisent par l'intermédiaire du complexe AST qui donne la possibilité au bloc calcanéo-pédieux de transférer les rotations axiales du pied vers la cheville et la jambe et inversement.

Comme nous l'avons étudié dans la première partie, le complexe articulaire sous talien est un système amortisseur permettant d'ajuster les mouvements tridimensionnels du pied dans l'espace et d'adapter les appuis du pied selon les variations du sol en jouant le rôle d'amortisseur.

### 1.3.3 La pronation du pied et ses conséquences

Comme nous venons de le décrire dans les parties précédentes, le mécanisme de pronation du pied va permettre d'absorber les forces de réactions au sol afin d'améliorer la phase d'amortissement et permettre au pied de s'adapter aux différentes variations du sol. Un degré de pronation optimal est donc avantageux.

Lors de l'éversion et donc de la pronation du pied, les axes de mouvement des articulations calcanéo-cuboïdienne et talo-naviculaire deviennent parallèles, ce qui permet au médio-tarse de se déverrouiller afin de permettre une meilleure mobilité du pied qui influencera l'amorti du pied. Pour la propulsion, le pied se rigidifie par le mécanisme de supination qui est permis par le croisement des axes des deux articulations.[7]

#### 1.3.3.1 Définition de l'hyperpronation

Actuellement, il existe une absence de consensus concernant le concept d'hyperpronation ou pronation excessive. La littérature actuelle reconnaît que l'amplitude de pronation est différente d'un individu à l'autre et elle est variable selon l'activité musculosquelettique.[27] En effet il y aura toujours un moment où notre pied devra se retrouver dans un mouvement de pronation au-delà de l'expérience « habituelle » rencontrée afin de prévenir une chute par exemple. Ainsi si le pied d'un individu se retrouve avec une pronation au-delà de son mouvement habituel, mais ne présente pas de pathologie, alors cette pronation exagérée ne sera pas forcément pathologique. Seulement, si une articulation bouge excessivement, et qu'il y a une incapacité à gérer ces mouvements, on peut en déduire que l'efficacité mécanique ou musculaire du système musculosquelettique est compromise et avoir des conséquences sur celui-ci.

Donc pour définir le mouvement excessif de pronation, on pourrait le décrire comme :

*« Une amplitude de mouvement de pronation qui rend le pied plus enclin à la surface d'appui et qui est supérieure à celle requise par l'individu pour s'adapter à sa morphologie et faire face aux forces exercées sur le système musculosquelettique lors des mouvements cinématiques de la marche ou la course. »*[27]

C'est une altération de la fonction du pied qui entraîne une phase de pronation plus longue et plus forte pendant le contact au sol. En effet, lorsque le temps passé en pronation lors de l'appui est augmenté. Les auteurs Snook et Grover [28] ont démontré que le médio-pied ne se rigidifie pas correctement pour enclencher la phase de propulsion. Si le temps passé en pronation est trop long, il

retarde les mouvements de supination et rotation externe du tibia qui permettent une bonne propulsion.

Ainsi le pied excessivement prôné génère moins de force car l'énergie absorbée est moins bien redistribuée afin de réaliser la flexion plantaire essentielle à la course. En cas d'hyperpronation, l'assimilation des forces de réactions sera donc moins bien réalisée et pourra entraîner une augmentation des charges transmises au segment jambier et donc un risque de dysfonction des structures.[28]

Cette pronation exagérée du pied peut être retrouvée dans une position de manière statique. En effet, certaines personnes peuvent posséder une déformation statique du pied, appelé « pied plat valgus » qui apparaît lorsque le pied est en charge.[29] Elle engendre une pronation de l'arrière-pied à travers les articulations subtalaire et talo-naviculaire liée à un affaissement de l'arche plantaire médiale et une abduction du médio-pied. Cette déformation peut être acquise et liée à une faiblesse des différentes structures du pied que nous étudierons par la suite. Elle peut engendrer les mêmes conséquences avec un verrouillage insuffisant lors de la course à pied.[29]

### 1.3.3.2 Son lien avec les autres articulations

Les parties distales du corps humain sont reliées aux parties proximales par l'intermédiaire des différents segments articulaires et chaînes musculaires. Ces chaînes permettent les ajustements permanents de nos mouvements face à notre environnement. Ainsi cela pourrait expliquer qu'un mouvement partant du pied puisse avoir des répercussions sur l'alignement des membres inférieurs.

En effet, les auteurs Hintermann et Nigg [9] ont analysé l'influence que le pied peut avoir sur l'alignement des membres inférieurs ainsi que sur le bassin.

Lorsque le pied est en position de pronation il se produit une réaction segmentaire en chaîne par l'intermédiaire des articulations au niveau du talus qui se placent en flexion dorsale, abduction et pronation. Cela induit une rotation interne au niveau du tibia. Or le mouvement de rotation externe au niveau du tibia est essentiel à la propulsion lors de la course. S'il est empêché, le genou ne va pas pouvoir chercher l'extension nécessaire lors de la fin de la phase de soutien. Une compensation va alors se produire par un mouvement de rotation interne du fémur afin d'assurer l'extension du genou.

Ces rotations internes au niveau du fémur vont venir placer le bassin en antéversion. [30][31]

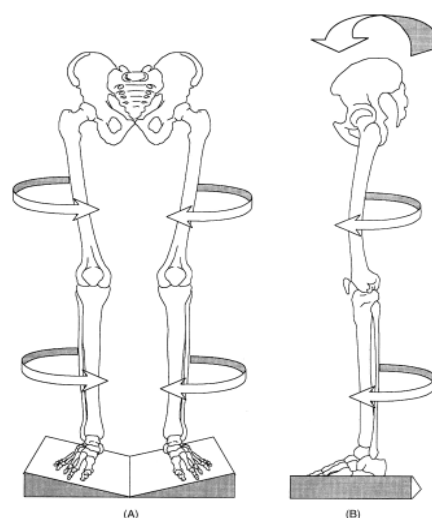


Figure 6 Effet de la pronation sur l'alignement des membres inférieurs [31]

Ces nombreux changements posturaux ajoutés à une dysfonction des transmissions de force de réaction au sol, liée à la pronation prolongée du pied, peuvent venir perturber l'ensemble du corps pendant la course et entraîner une sollicitation exagérée des différents systèmes musculaires et articulaires par une répartition déséquilibrée des contraintes mécaniques.

Nous venons de décrire le phénomène de pronation excessive et les conséquences qu'elle pouvait engendrer sur les segments sus-jacents et sur l'absorption des impacts au sol. Nous allons voir les structures qui accompagnent l'articulation subtalaire dans ce système d'amortissement lors de la course et dans le maintien de la pronation, et comment leurs dysfonctions peuvent être la cause d'une pronation excessive.

#### 1.3.4 Système de maintien en lien avec la pronation du pied

Le complexe articulaire sous-talien est maintenu par des facteurs actifs que sont les muscles et des facteurs passifs capsulo-ligamentaires. Ils participent au bon fonctionnement du maintien statique et dynamique de la pronation du pied pour établir le système d'amortissement et de propulsion essentiel à la course à pied. Lors de la course à pied, ce sont les tissus mous qui vont être les premiers touchés. On remarque un affaissement excessif de l'arche longitudinale médiale lors d'une pronation prolongée.

#### **Structures passives du pied en lien avec la pronation du pied**

L'aponévrose plantaire est importante dans le maintien de la pronation. Elle commence de la face inférieure du calcanéum et vient s'insérer au niveau des articulations métatarso-phalangiennes. Elle limite donc l'affaissement de l'arche médiale en se contractant et en rapprochant ses insertions durant l'appui, lors de l'extension des orteils, permettant ainsi une meilleure stabilisation.[17] Ce mécanisme est l'effet « Treuil » ou « Windlass Mechanism ».[32]

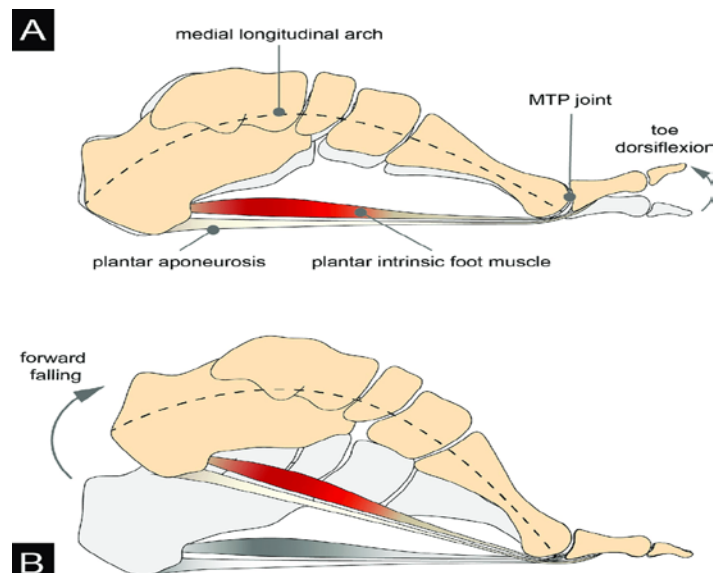


Figure 7. Windlass mechanism ou "effet treuil" lors de l'appui [33]

La pronation de l'arrière-pied est gérée à l'aide d'un système ligamentaire médial court et puissant qui supporte des tensions considérables. On retrouve :

- le ligament deltoïdien (ligaments tibio-talaire antérieur et postérieur, tibio-calcaneen, tibio-naviculaire) qui est le principal ligament qui retient le mouvement de pronation [34] ;

- le ligament interosseux talo-calcanéen qui est le pivot des mouvements de l'articulation subtalaire, il permet à l'articulation de revenir à une position neutre en contrôlant les mouvements du talus sur le calcaneum ou inversement ;
- le ligament calcanéonaviculaire plantaire est lui aussi reconnu pour être l'un des principaux stabilisateurs de l'arche plantaire interne.[35]

### **Structures actives en lien avec la pronation du pied**

Les différentes arches du pied et les structures osseuses de la cheville et du pied sont également maintenues et rigidifiées par une stabilisation dynamique avec la contraction du système musculotendineux extrinsèque et intrinsèque du pied qui permet d'affiner et de préciser leurs mouvements. Ils jouent un rôle dans le contrôle de la pronation de l'arrière-pied.[36]

Au niveau des **muscles extrinsèques** :

- Le tibial postérieur, le tibial antérieur, le long fléchisseur de l'hallux et commun des orteils sont les principaux muscles qui participent à l'inversion du pied. Ils gèrent le positionnement du pied dans la phase oscillante et le mouvement d'inversion/éversion en contrant la pronation du pied par leur contraction excentrique lors de l'appui. Ils améliorent la rigidité du pied en réalisant la supination lors de la propulsion et participent donc au soutien de l'arche médiale.[11]
- Le triceps sural participe à l'action frénatrice à l'appui ainsi qu'à la force explosive durant la phase de propulsion. Il participe à la supination du pied et le contrôle de l'éversion après l'absorption du choc.[11]
- Les muscles long et court fibulaire et le troisième fibulaire sont les principaux muscles qui gèrent l'éversion du pied. Ils s'associent, lors de la phase d'oscillation, avec les muscles inverseurs permettant un meilleur positionnement de l'arrière-pied dans l'espace afin d'assurer un bon appui. Ces muscles stabilisent le pied en luttant contre l'inversion car ils sont pronateurs et abducteurs du pied. Ils assurent une grande stabilité latérale du pied. Ils freinent l'appui du pied lors de l'amortissement et lors de la propulsion ils se contractent et permettent d'étirer l'aponévrose plantaire et donc de mieux restituer l'énergie des forces de réactions.[11]

Ces muscles jouent un rôle mobilisateur et moteur non négligeable lors du mouvement de pronation du pied en travaillant ensemble pour maintenir la stabilité de l'arche longitudinale médiale.

Au niveau des **muscles intrinsèques** :

Ils assurent un contrôle de la dynamique du pied et du mouvement de pronation en évitant l'affaissement de l'arche médiale. Ils vont être responsables de la stabilisation du pied dans l'espace. Ils forment des systèmes neuronaux transmettant des messages sensitifs et moteurs si la stabilité du pied est altérée.[36] Situés sous la plante du pied, ils se contractent de façon excentrique lors de la phase d'amortissement du pied et de façon concentrique à la fin de la phase de soutien afin de produire un travail de propulsion et de solidifier le pied au début de la phase oscillante. Ils possèdent un rôle non-négligeable lors du contrôle et du pied à la fin de la phase portante. Une faiblesse ou une dysfonction de ces derniers peuvent entraîner un défaut de stabilisation du pied et une chute de l'os naviculaire entraînant l'augmentation de la pronation du pied.[36]

On retrouve parmi les muscles intrinsèques jouant un rôle dans le maintien de la voûte plantaire et de la pronation :

- Abducteur de l'hallux
- Court fléchisseur de l'hallux
- Adducteur de l'hallux
- Court fléchisseur des orteils
- Carré plantaire
- Court fléchisseur du V
- Court abducteur du V
- Interosseux plantaire
- Lombricaux

Le pied possède donc d'un côté une armature osseuse rigide et d'un autre une mobilité que les éléments musculaires et capsulo-ligamentaires lui permettent. Ils empêchent l'affaissement médial du pied lors de l'éversion à l'appui. Ils sont donc essentiels à la répartition des forces exercées lors de la course et permettent également de s'adapter à toutes les irrégularités de terrains en se déformant.

Malgré tous ces éléments de maintien osseux, capsulo-ligamentaires et musculaires qui permettent de contrôler les mouvements du pied, certaines personnes peuvent présenter une laxité ligamentaire, un mauvais contrôle neuromusculaire ou encore une fonction altérée avec une faiblesse musculaire entraînant un mauvais maintien de la structure du pied. Le mouvement de pronation du pied ne sera pas bien retenu et cela pourrait entraîner une plus grande durée ou amplitude de ce mouvement.[37][38][36]

Nous avons donc constaté que la posture et la biomécanique du pied, surtout la pronation, étaient reliées aux mouvements des articulations sus-jacentes et aux différents systèmes musculaires et ligamentaires. Une majoration de celle-ci engendre des conséquences sur l'alignement des segments sus-jacents et sur la transmission des forces exercées sur le coureur. Ainsi l'amortissement risque d'être moins contrôlé entraînant une instabilité qui ne dissipera pas correctement les impacts au sol. Nous pouvons donc nous demander si elle peut être un facteur de risque dans la survenue des pathologies lors de la course.

Quelles sont les principaux mécanismes de blessures liées à la course à pied ? Et quelles sont ces blessures ?

## 1.4 Les blessures en course à pied

Malgré les avantages avérés de la course à pied sur la santé physique et mentale, les blessures liées à la course à pied ou « Running Related Injuries (RRI) » surviennent fréquemment chez les coureurs. En effet environ 50% des coureurs subissent une blessure liée à la course dans l'année tandis que 25% des coureurs seront blessés à un moment donné dans leur pratique.[39]

Après une multitude de définitions, la réunion d'un comité international en 2015 a permis de donner une définition globale des blessures rencontrées en course à pied :

*« Douleurs musculosquelettiques des membres inférieurs liées à la course à pied (en compétition ou à l'entraînement) entraînant une restriction ou un arrêt de la course (distance, vitesse, durée ou entraînement) pendant au moins sept jours ou trois entraînements programmés consécutifs, ou obligeant le coureur à consulter un médecin ou autre professionnel de santé ».* [40]

Les blessures liées à la course à pied peuvent être classées en deux catégories : les blessures aiguës liées à un traumatisme et les blessures de surutilisation.

### 1.4.1 Physiopathologie des blessures aiguës

Les blessures aiguës sont moins fréquents en course à pied et elles sont le plus souvent causées par un traumatisme spécifique et identifiable ou à la suite d'un impact soudain.[41] Ces blessures sont dues à des forces d'impact et à des charges qui dépassent la capacité des structures musculosquelettiques à un moment précis. Les blessures les plus retrouvées dans la littérature sont les lésions musculaires et tendineuses, les lésions osseuses comme les fractures et les lésions articulaires telles que les entorses ou les luxations. [41]

### 1.4.2 Physiopathologie des blessures de surutilisation

Les blessures de surutilisation des membres inférieurs sont les blessures les plus répandues en course à pied. Environ 70% à 80% des blessures liées à la course sont des blessures de surcharge. Elles ont pour incidence entre 19% et 79% dans la population selon les études.[41]

Elles résultent d'une accumulation excessive et répétée de contraintes appliquées sur le système musculosquelettique sans repos suffisant créant des microtraumatismes répétés.[42] Elles peuvent survenir à cause de la mauvaise gestion de la quantité de stress mécanique appliquée sur les tissus et aux différents facteurs intrinsèques et extrinsèques de l'individu qui permettent de gérer cette charge. [43] L'identification de ces facteurs est donc essentielle pour contribuer à la prévention des risques de blessures dans la course à pied.

Les blessures de surutilisation lors de la course à pied les plus fréquentes rapportées par les études épidémiologiques réalisées sont le syndrome de stress tibial médial, les tendinopathies d'Achille, la fasciite plantaire et le syndrome fémoro-patellaire.[44]

Ces lésions des membres inférieurs sont principalement localisées au genou, au bas de la jambe et au pied. Les localisations les moins fréquentes se trouvent à la cheville et à la hanche.[41]

### 1.4.3 Pathologies courantes

N'étant pas le but de cette revue de littérature et ne pouvant pas définir en détail toutes les pathologies liées à la course à pied nous les citerons seulement afin de les garder en mémoire et nous détaillerons et garderons les plus fréquentes d'entre elles.

#### Pathologies au niveau de la hanche

**Les tendinopathies** sont liées à une dégénérescence du tendon causée par une surutilisation et une surcharge mécanique trop élevée par rapport à leur seuil physiologique. Ces surcharges créent des microtraumatismes répétitifs qui affaiblissent les capacités réparatrices entraînant une mauvaise régénération des fibres de collagène et des tissus environnants. Elles affectent la vascularisation des éléments tendineux en entraînant sa diminution et donc de la cicatrisation.[45]

#### Pathologies au niveau du genou

Au niveau du genou les trois blessures les plus rencontrées sont les tendinopathies patellaires, le syndrome fémoro-patellaire et le syndrome de la bandelette ilio-tibiale.[41]

Le **syndrome fémoro-patellaire** peut se développer quand il y a une égalité des charges fémoro-patellaires et un déséquilibre dans les forces contrôlant le mouvement de la rotule lors de la flexion et de l'extension.[46] Ce sont ces déséquilibres qui peuvent provoquer des douleurs fémoro-patellaires. Elles se décrivent comme « des douleurs derrière ou autour de la patella qui augmentent avec une activité impliquant une flexion de genou et une charge ».[47]

Le **syndrome de la bandelette ilio-tibiale** présente une symptomatologie avec une douleur au niveau du condyle latérale du fémur. Longtemps décrit comme les conséquences d'une friction entre le tractus ilio-tibial et le condyle, de récentes études montrent que la douleur pourrait venir du contact entre le tendon et l'épicondyle latéral à 20-30° de flexion de genou, angle où ce contact est le plus fort. Cette force de contact répétée entraînerait également une compression au niveau d'une bourse adipeuse riche en terminaisons nerveuses entre la bandelette et le condyle qui mettrait en contrainte le tractus et serait à l'origine des douleurs.[48]

#### Pathologie au niveau de la jambe

Le **syndrome de stress tibial médial** est la blessure la plus représentée dans la course à pied concernant entre 13,2 % et 17,3 % de coureurs.[49] Son étiologie n'est pas encore bien définie. Il pourrait être défini comme une périostite de « traction », c'est-à-dire une inflammation du périoste ou comme une enthésopathie des muscles tibial postérieur, tibial antérieur ou soléaire. Il pourrait survenir après une surcharge osseuse tibiale causée par les frappes répétitives du pied causant des micro-dommages qui pourraient amplifier l'activité des ostéoclastes et donc diminuer la résistance osseuse.[50]

La **fracture de stress tibial** est courante et concomitante au syndrome de stress tibial médial, passant de l'atteinte du périoste à une rupture complète de la corticale. Elles se produisent suite à une mauvaise gestion de la charge de travail qui crée un stress répétitif anormal sur l'os. Des microfissures s'accumulent et dépassent la capacité de remodelage de l'os et conduisent à la fracture.[51] Les fractures de stress tibiales sont les localisations les plus fréquentes.[52]

## Pathologies au niveau du pied

**La fasciite plantaire** est une inflammation de l'aponévrose plantaire qui relie le calcaneum et la tête des métatarses. Récemment, plusieurs études ont observé une absence de cellules inflammatoires liées à la pathologie. Elle serait plutôt liée à une dégénération du fascia sur la tubérosité du calcaneum et des fascias environnants. Elle est la cause la plus fréquente de douleur au talon et concerne 15% des pathologies musculo-tendineuses chez le coureur à pied.[53]

## 2 PROBLEMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHESES

Les défauts posturaux et biomécaniques liés au sportif et à un sport sont souvent étudiés dans les travaux de recherche scientifique s'intéressant aux facteurs étiologiques des blessures. L'analyse de ces derniers peut s'avérer utile afin d'objectiver et d'améliorer le geste sportif du coureur lui permettant d'améliorer ses performances. De plus, elles peuvent permettre de relever des problèmes sous-jacents comme des déséquilibres musculaires ou des faiblesses permettant aux personnels de santé d'agir en conséquence pour prévenir l'apparition de blessures permettant au coureur de pouvoir pratiquer autant que possible son loisir ou sa carrière.

En effet, les blessures liées à la course sont un enjeu de santé publique. Elles ont un impact physique et psychologique considérable et peuvent nécessiter une longue rééducation et aller jusqu'à un arrêt temporaire ou définitif de la pratique. De plus, les coûts des frais médicaux pour le traitement des blessures ainsi que les frais indirects liés à l'absentéisme au travail peuvent avoir un coût élevé. Ainsi le nombre croissant de coureurs nous pousse à la quête des facteurs de risques pouvant générer des blessures et fait partie des objectifs principaux des chercheurs et thérapeutes afin de prévenir leur survenue et avoir un rôle à jouer en termes de prévention.

Actuellement de nombreuses études se sont penchées sur l'influence de la posture du pied et des mouvements d'éversion et notamment au niveau de la pronation de l'arrière-pied sur le risque d'apparition de blessures. Les analyses scientifiques dans la littérature divergent et des résultats contradictoires ou peu de preuves scientifiques en sont ressortis, c'est pour cela que notre revue de littérature se penche sur le sujet. Notre problématique est donc la suivante :

**« La posture du pied et le mouvement de pronation chez les coureurs à pied influencent-ils l'apparition de blessures des membres inférieurs liées à la course ? »**

### Objectifs :

Cette revue de littérature a pour objectif d'analyser et comparer les résultats des différents articles scientifiques de la littérature objectivant le nombre de blessures apparaissant en fonction de la posture et des mouvements de pronation du pied du coureur. En tant que future masso-kinésithérapeute, avoir connaissance de la biomécanique d'un sport et des facteurs de risque d'apparition de blessures est important pour pouvoir intervenir lors de la prévention de ces dernières ou de la prise en charge de patients sportifs.

### Hypothèses

Après le recueil de données réalisé dans la première partie de ce mémoire, l'hypothèse première émise serait qu'une posture, des mouvements amplifiés ou prolongés lors de l'éversion, de la pronation du pied semblent être un facteur de risque dans la survenue de certaines pathologies liées à la course à pied.



## 3 METHODE

La recherche d'articles scientifique a été réalisée sur plusieurs bases de données différentes afin d'élargir le nombre de publications disponibles. Ainsi, Pubmed, Cochrane Library, Science Direct et Google Scholar ont été utilisés.

### 3.1 Critères d'éligibilités des études sélectionnées

#### 3.1.1 Schéma d'étude

Le but de cette revue de littérature est de mettre en lien la posture ou le mouvement de pronation du pied comme étant un facteur de risque dans la survenue de blessures des membres inférieurs chez les coureurs à pied.

Nous allons donc quantifier et interpréter le possible lien entre ces facteurs et la survenue d'une blessure liée à la course à pied. Il s'agira donc d'une question clinique qui relèvera du domaine étiologique.

Pour le choix de l'inclusion de nos études, le grade NHMRC (National Health and Medical Research Council) est la référence des niveaux de preuves des études utilisées selon le type de questions cliniques.[54]

CAUSALITÉ Phénomène contrôlable fréquent	Étude contrôlée randomisée
CAUSALITÉ Phénomène non contrôlable fréquent	Suivi de cohorte (exposés/non exposés)
CAUSALITÉ Phénomène rare	Étude cas-témoin

Figure 8 Grade NHMRC [54]

Il existe différents schémas d'études cliniques, elles peuvent être expérimentales ou observationnelles :

Les études expérimentales sont des études contrôlées randomisées ou non.

Les études observationnelles sont plutôt des études analytiques (études de cohortes, cas-témoins, transversales), qui cherchent un lien entre un facteur de risques et la survenue d'une pathologie ou descriptives (étude de cas), qui décrivent seulement l'état de santé du patient.

Nous retiendrons alors des schémas d'étude privilégiées dans le domaine étiologique que sont les études observationnelles analytiques en particulier les études de cohorte car elles représentent le plus haut niveau de preuve des études observationnelles. Des schémas d'études cas-témoins seront acceptés si des études prospectives ne sont pas disponibles.

#### 3.1.2 Critères d'inclusion et critères d'exclusion des études

##### Critères d'inclusion

Les critères d'inclusion des études sont :

- Etudes sorties après 2013
- Des études de cohortes ou des études cas-témoins
- En langue française ou anglaise

- Etudes incluant les facteurs de risques énoncés

### Critères d'exclusion

Les critères d'exclusion des études sont :

- Etudes antérieures à 2013 car les articles seront considérés comme trop anciens
- Autres schémas d'études que des études de cohortes et études cas-témoins car elles seront considérées comme ayant un trop faible niveau de preuves
- Etudes sur une autre population que l'Homme

### 3.1.3 Population

<b>Critères d'inclusion</b>	<b>Critères d'exclusion</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tous les coureurs sont inclus quel que soit leur kilométrage</li> <li>– Tout niveau de pratique accepté (amateurs, récréatifs, professionnels)</li> <li>– Avoir entre 18 et 65 ans</li> <li>– Hommes et femmes</li> <li>– Ne pas avoir subi de blessures dans les 6 mois précédents l'étude</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'apparition d'une autre pathologie que les blessures associées à la course à pied</li> <li>– L'étude d'un autre sport que la course à pied</li> <li>– L'apparition de blessures concernant les membres supérieurs ou le tronc</li> <li>– Être militaire car la pratique de la course à pied est différente</li> </ul>

### 3.1.4 Facteurs de risque

Nous allons étudier l'influence de la posture ou du mouvement de pronation du pied précédemment décrit dans la partie « Introduction » de notre revue de littérature. Nous allons comparer l'apparition d'une pathologie ou non liée à nos facteurs de risque.

Le mouvement de l'arrière-pied est couramment utilisé dans la littérature comme moyen alternatif d'exprimer la pronation de l'articulation sous-talienne pendant la course à pied. L'axe de l'articulation sous-talienne n'est pas aligné avec les axes du pied et aucun repère anatomique existe sur le talus. De plus le mouvement de pronation est indissociable des autres mouvements du pied lors de l'appui. Nous rechercherons donc des articles évoquant la posture du pied et les mouvements de l'arrière-pied comme facteurs de risque d'apparition de blessures chez les coureurs.

Il n'y aura pas de comparateur car ce dernier est l'absence du facteur de risque étudié.

### 3.1.5 Critère de jugement

Le critère de jugement de notre facteur de risque sera l'apparition de pathologies des membres inférieurs liées à la course à pied.

## 3.2 Méthode de recherche

### 3.2.1 Modèle PICO et équation de recherche

Dans cette revue de littérature, nous avons utilisé le modèle PICO afin d'élaborer notre question de recherche. Il permet d'en tirer les mots-clés ainsi que de leur trouver des synonymes automatiquement à l'aide de la fonctionnalité « MeSH (Medical Subject Headings) » sur la base de données Pubmed. Ces termes MeSH permettent d'affiner la recherche afin d'augmenter la quantité

d'articles pertinents répondant à notre question clinique et d'éliminer le « silence » et le « bruit » lors des recherches.

Les opérateurs booléens « AND », « OR » et « NOT » ont été utilisés pour relier les mots clés entre eux et créer notre question de recherche afin de regrouper le maximum d'articles.

	<b>Mots-clés</b>	<b>Synonymes en anglais</b>	<b>Termes MeSH disponibles</b>
<b>Population</b>	Coureur(e)s à pied	Running, Runners	« Running/injuries »
<b>Intervention</b>	Pronation ou éversion du pied	Foot pronation, foot posture, rearfoot eversion, kinematics factors	« Pronation »
<b>Comparateur</b>	Facteur de risque absent		
<b>Outcome</b>	Apparition ou présence d'une blessure de surutilisation	Overuse injuries Running Injuries	

Différentes bases de données ont été consultées comme :

- Pubmed
- Cochrane Library
- ScienceDirect
- Google Scholar

Ainsi différentes équations ont été utilisées sur les différentes barres de recherche :

Sur Pubmed :

(((((("Pronation"[Mesh]) OR (rearfoot eversion)) OR (foot pronation)) OR (foot posture)) OR (kinematics factors)) AND ("Running/injuries"[Mesh])) OR (runners)) AND (overuse injuries)

Différents filtres ont été utilisés comme la date de parution à partir de 2013 et la langue utilisée.

Sur Cochrane Library et Google Scholar :

(Foot pronation OR rearfoot eversion OR kinematics factors) AND (running OR runners) AND (overuse injuries OR running injuries)

Sur ScienceDirect :

(Foot pronation OR kinematics factors) AND (running OR runners) AND (overuse injuries)

### 3.2.2 Stratégie de recherche

Notre stratégie de recherche d'articles utilisée sur les différentes bases de données a été réalisé selon un ordre précis.

1<sup>ère</sup> étape : une recherche avancée a été faite sur les différentes bases de données à l'aide des questions de recherche décrites précédemment et seules les études sorties après 2013 ont été retenues.

2<sup>ème</sup> étape : sélection des articles par la lecture de leur titre et la concordance avec notre question de recherche clinique.

3<sup>ème</sup> étape : les articles présents en doublons sur les différentes bases de données ont été exclus.

4<sup>ème</sup> étape : sélection des articles par la lecture de leur abstract afin d'avoir un aperçu de l'étude, sa population et son objectif à l'aide des critères d'inclusion.

5<sup>ème</sup> étape : sélection par la lecture entière des articles.

Dans la partie « Résultats », un diagramme de flux a été établi afin de représenter les différentes étapes réalisées pour arriver au nombre final d'articles sélectionnés. De plus, le nombre d'articles exclus a été cité ainsi que la justification de cette suppression.

### 3.3 Méthode d'extraction et analyse des données

#### 3.3.1 Analyse de la qualité méthodologique des études incluses

Analyser la qualité méthodologique d'une revue de littérature est très important afin qu'elle soit la plus précise possible. Ainsi pour la qualité interne de la revue de littérature, nous utiliserons l'échelle AMSTAR-2.

De plus, dans une revue de littérature il est important de vérifier la qualité globale des études incluses et leur qualité méthodologique. Il s'agit de déterminer la qualité interne de chacune des études incluses à l'aide d'échelles afin de savoir si elles présentent certains risques de biais.

Les biais retrouvés sont l'une des causes d'erreurs liées à la méthode employée lors de l'analyse des études. Les biais dans une revue de littérature étiologique peuvent être nombreux et ont pour conséquences une estimation incorrecte de l'association entre l'exposition du facteur et le risque d'atteinte. Ils peuvent engendrer des résultats erronés lors des interprétations statistiques.

On peut citer quelques exemples de biais qui apparaissent le plus souvent dans les études étiologiques :

- Biais de sélection : ce sont les erreurs lors du recrutement de la population avec notamment les sujets non-répondants et les sujets perdus de vue.
- Biais de mesure : ce sont les erreurs lors de la mesure du facteur de risque ou de ses conséquences.
- Biais de confusion : peuvent être la présence d'autres facteurs de risques qui ne sont pas pris en compte.

Pour les études de cohortes et les études cas-témoins, l'échelle utilisée pour évaluer leur qualité est la NEWCASTLE OTTAWA SCALE (Annexe 2).[55]

Elle se note sur 9 avec une cotation à l'aide d'étoiles. Elle évalue 3 domaines de l'étude :

- La sélection des groupes d'études = 4 points
- La comparabilité entre les groupes = 2 points
- L'exposition au critère de jugement et l'analyse des résultats = 3 points

Au niveau de son interprétation, un score de :

- 3 ou 4 étoiles dans la partie sélection ET 1 ou 2 étoiles dans la partie comparabilité ET 2 ou 3 étoiles dans la partie exposition signifiera une **haute qualité** de l'étude.
- 2 étoiles dans la partie sélection ET 1 ou 2 étoiles dans la partie comparabilité ET 2 ou 3 étoiles dans la partie exposition signifiera une **qualité moyenne** de l'étude.
- 0 ou 1 étoile dans la partie sélection OU 0 étoiles dans la partie comparabilité OU 0 ou 1 étoile dans la partie exposition signifiera une **faible qualité** de l'étude.

Pour résumé :

Pour un score inférieur ou égal à 3 étoiles, la qualité méthodologique sera considérée comme faible.

Pour un score allant de 4 à 6 étoiles, la qualité de l'étude sera considérée comme moyenne à bonne.

Pour un score égal ou supérieur à 7 étoiles, la qualité sera considérée comme bonne à très haute.

### 3.3.2 Extraction des données récoltées

Par la suite, après avoir analysé la méthodologie des études, nous avons extrait les informations essentielles des études permettant de mettre en liant la pronation et l'apparition de blessures chez les coureurs à pied. Des tableaux récapitulatifs sont disponibles dans la partie « Résultats ».

Les principales données récoltées ont été :

- Le titre de l'étude
- Le nom des auteurs
- L'année de la publication
- La méthodologie et le schéma d'étude
- L'échantillon et le détail de la population
- Les possibles conflits d'intérêts notamment le financement de l'étude
- Les résultats et risques de biais
- L'évaluation de la qualité de l'étude

### 3.3.3 Quantification des résultats

Afin d'analyser les différents résultats récoltés après la lecture des articles, nous nous sommes appuyés sur plusieurs indices de mesures qui ont permis de quantifier le lien d'association entre le facteur de risque et l'atteinte. Pour cela nous avons calculé ou relevé le risque relatif (RR) ou l'Odds Ratio (OR). Ils permettent de prouver l'acuité du lien entre les deux.

Dans cette revue de littérature les facteurs de risque étudiés sont la posture du pied en pronation ou les mouvements dynamiques de pronation et l'apparition d'une blessure musculosquelettique chez le coureur à pied.

Pour les études de cohortes, l'indice de mesure utilisé est le **Risque Relatif (RR)**.

Il correspond au rapport :

$$RR = \frac{\text{Risque de développer la maladie si exposé au facteur de risque}}{\text{Risque de développer la maladie si non exposé au facteur de risque}}$$

Pour les études cas-témoins et transversales, l'indice de mesure utilisé est l'**Odds Ratio (OR)**.

Il correspond au rapport :

$$OR = \frac{\text{Odds de l'atteinte si exposé au facteur de risque}}{\text{Odds de l'atteinte si non exposé au facteur de risque}}$$

L'Odds Ratio de l'atteinte chez les exposées sera le rapport entre la probabilité chez les coureurs en pronation excessive d'avoir une blessure et la probabilité chez les coureurs en pronation excessive de ne pas avoir de blessure.

Le RR ne pourra pas être calculé dans les études cas/témoins car nous ne connaissons pas l'incidence de l'atteinte.

Pour la signification statistique, il sera nécessaire de calculer un **intervalle de confiance (IC) à 95%** pour préciser le RR et l'OR de chaque étude et démontrer qu'ils sont statistiquement significatifs.

Si l'IC contient 1, l'association sera non significative.

Si l'IC ne contient pas 1, l'association sera significative :

- Soit  $IC > 1$  et le RR ou l'OR significativement  $> 1$  alors l'exposition sera associée à l'apparition de l'atteinte.
- Soit  $IC < 1$  et le RR ou l'OR significativement  $< 1$  alors l'exposition sera associée à la protection.

Lorsque le calcul des RR ou des OR n'a pas été possible, la moyenne, l'écart-type ainsi que la **différence de moyennes** et son intervalle de confiance entre les groupes ont été relevés ou calculés.

En plus des mesures d'associations, nous utiliserons également d'autres tests statistiques. On utilisera **la taille d'effet ou D de Cohen** qui est un test d'hypothèse. Il signifie « à quel degré un phénomène donné est présent dans la population ». Plus la taille d'effet sera grande plus, plus on pourra rejeter que l'hypothèse est fausse.

Si d se situe autour de 0,2, la taille d'effet sera faible.

Si d se situe autour de 0,5, l'effet sera modéré.

Si d se situe au-delà ou à 0,8, l'effet sera considéré comme fort.

Nous recueillerons ou nous calculerons également la **probabilité p** qui est un test d'hypothèses et qui permet de déterminer si le résultat significatif d'une étude peut être dû au fait du hasard.

- Pour rejeter la probabilité de l'hypothèse nulle :  $(p) < \text{risque } \alpha \text{ de } 0,05\%$
- Pas de rejet de l'hypothèse nulle si :  $(p) > 0,05\%$

Le risque  $\alpha$  est la probabilité de conclure à une différence alors qu'elle n'existe pas.

#### 3.3.4 Synthèse des résultats

Les caractéristiques détaillées de chaque étude seront décrites dans différents tableaux disponibles en « Annexes » de la revue et un tableau récapitulatif sera disponible dans notre partie « Résultats ».

De plus, les résultats statistiques de chaque article de la revue seront décrits et expliqués à la suite. Enfin, la comparaison et la discussion des résultats des articles inclus se feront dans la partie « Discussion » de la revue.

## 4 RESULTATS

### 4.1 Description des études

#### 4.1.1 Diagramme de flux

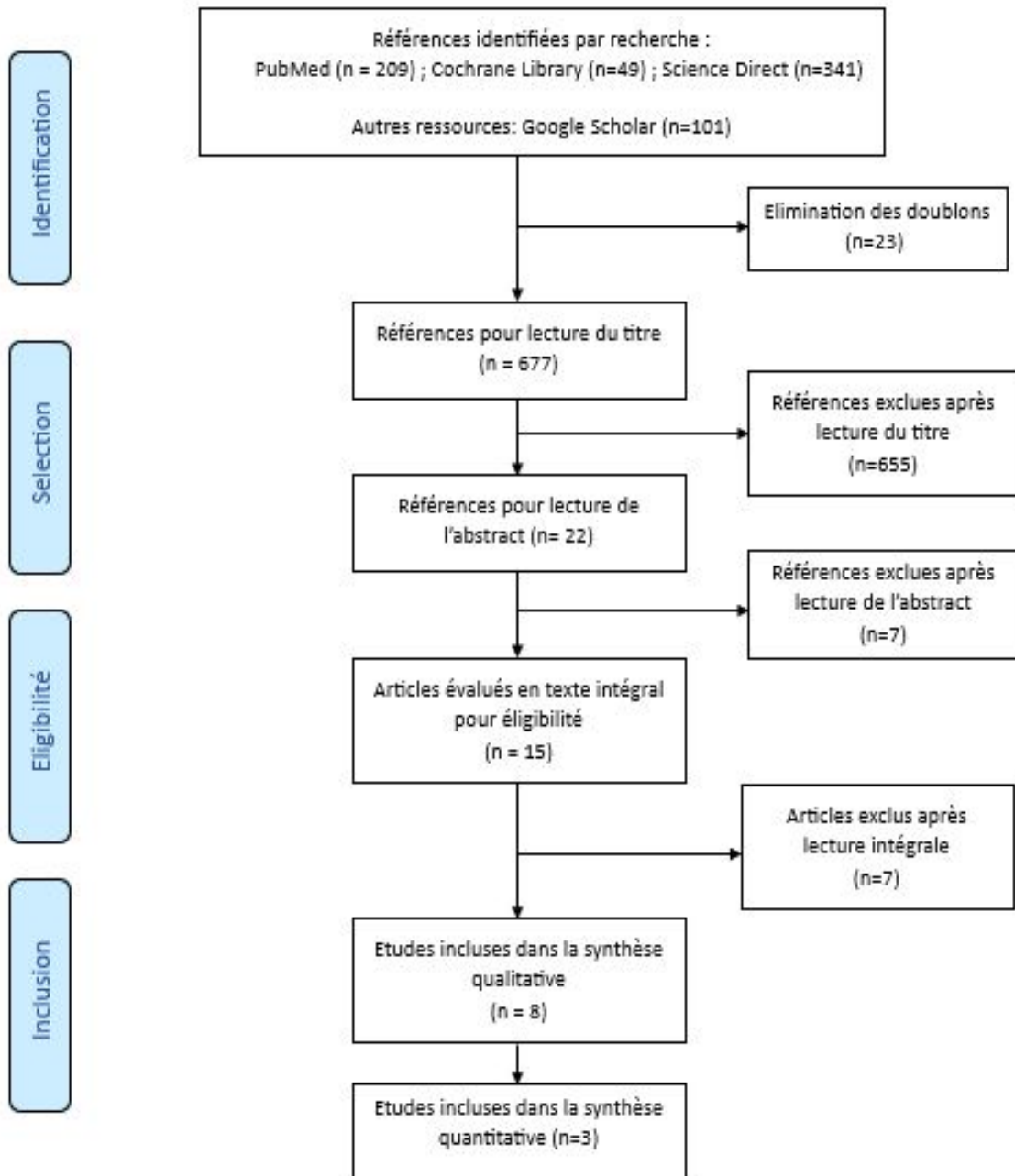


Figure 9. Diagramme de flux

#### 4.1.2 Articles exclus

Etudes exclues par lecture de l'abstract :

<b>ETUDES EXCLUES APRES LECTURE DU RESUME</b>	
<b>Articles</b>	<b>Raisons de l'exclusion</b>
Hetsroni <i>et al.</i> [56]	Population : étude portant sur des militaires
Silva <i>et al.</i> 2022 [57]	Schéma d'étude : étude transversale
Franklyn-Miller <i>et al.</i> [58]	Population : étude portant sur des militaires
Bredeweg <i>et al.</i> 2013 [59]	Population : temps de suivi trop court
Chang <i>et al.</i> 2014 [60]	Population : étude portant sur la marche et non sur la course à pied
Malisoux <i>et al.</i> 2016 [61]	Schéma d'étude : essai clinique randomisé
Becker <i>et al.</i> 2018 [62]	Schéma d'étude : étude transversale

Tableau I. Etudes exclues après lecture du résumé

Etudes exclues par lecture intégrale :

<b>ETUDES EXCLUES APRES LECTURE INTEGRALE</b>	
<b>Articles</b>	<b>Raisons de l'exclusion</b>
Bramah <i>et al.</i> 2018 [63]	Intervention : pas suffisamment de variables étudiées sur le mouvement du pied
Koldenhoven <i>et al.</i> 2020 [64]	Outcome : étude portant sur la douleur et non sur les blessures de surutilisation.
Brund <i>et al.</i> 2017 [65]	Population : étude portant seulement sur des coureurs masculins
Noehren <i>et al.</i> 2013 [66]	Population : étude portant seulement sur des coureuses féminines
Zifchkok <i>et al.</i> 2019 [67]	Outcome : relation entre la structure du pied et la distribution de la force de réaction au sol chez les coureurs
Koblbauer <i>et al.</i> 2014 [68]	Outcome : relation entre les facteurs cinématiques du pied et la fatigue induite par la course
Lachniet <i>et al.</i> [69]	Intervention : étude portant que sur les mouvements de la hanche et non sur le pied Population : coureurs adolescents et non adultes

Tableau II. Etudes exclues après lecture intégrale



#### 4.1.3 Articles inclus

<p><b>Foot pronation is not associated with increased injury risk in novice runners wearing a neutral shoe : a 1-year prospective cohort study</b></p> <p>Nielsen <i>et al.</i> 2014 [70]</p>
<p><b>No association between Q-angle and foot posture with running related-injuries : a 10-week prospective cohort study</b></p> <p>Ramskov <i>et al.</i> 2013[71]</p>
<p><b>Association between Foot Posture Index and running related-injuries : a case-control study</b></p> <p>Perez-Morcillo <i>et al.</i> 2018 [72]</p>
<p><b>A 2 Year Prospective Cohort Study of Overuse Running Injuries : The Runner and Injury Longitudinal Study</b></p> <p>Messier <i>et al.</i> 2018 [73]</p>
<p><b>Association between biomechanical and clinical/anthropometrical factors and running-related injuries among recreational runners : a 52-week prospective cohort study</b></p> <p>Jungmalm, Nielsen <i>et al.</i> 2020 [74]</p>
<p><b>Comparison of ankle kinematics and ground reaction forces between prospectively injured and noninjured collegiate cross-country runners</b></p> <p>Kuhman <i>et al.</i> 2016 [75]</p>
<p><b>A prospective comparison of lower extremity kinematics and kinetics between injured and non-injured collegiate cross-country runners</b></p> <p>Dudley <i>et al.</i> 2017[76]</p>
<p><b>Factors contributing to Medial Stress Syndrome in Runners : a prospective study</b></p> <p>Becker, Nakajima and Wu 2018 [77]</p>

Tableau III. Articles inclus

#### 4.1.4 Caractéristiques des études incluses

ARTICLES	Schéma d'études et pays	Durée de suivi et consignes	Nombres de participants et de blessés	Facteurs étudiés	Mesure du facteur de risques	Protocole de mesure (terrain, vitesse...)	Outcome et définition de la blessure liée à la course
<b>Nielsen et al.</b> [70]	Etude de cohorte au Danemark	1 an Les coureurs pouvaient courir sans restriction sur le lieu, la durée, la distance et l'intensité avec des chaussures neutres	Total = 927 coureurs récréatifs 252 blessés	Posture statique du pied en pronation	Foot Posture Index		Blessures liées à la course « Plainte musculosquelettique du dos ou des membres inférieurs causée par la course à pied, qui a limité la pratique pendant au moins une semaine ».
<b>Ramskov et al.</b> [71]	Etude de cohorte au Danemark	10 semaines Les coureurs pouvaient courir sans restriction sur le lieu, la durée, la distance et l'intensité avec des chaussures neutres	Total = 60 coureurs novices 13 blessés	Posture statique du pied en pronation	Foot Posture Index		Blessures liées à la course « Plainte musculosquelettique du dos ou des membres inférieurs causée par la course à pied, qui a limité la pratique pendant au moins une semaine ».
<b>Messier et al.</b> [73]	Etude de cohorte aux Etats-Unis	2 ans Les coureurs devaient maintenir leurs habitudes d'entraînement	Total = 300 coureurs récréatifs 199 blessés	Fonction dynamique : variables cinématique de l'éversion de l'arrière-pied	Système de capture de mouvement 3D	Sur piste pendant 22,5m à leur allure d'entraînement Chaussures personnelles	Blessures de surutilisation Grade 1 = Maintien d'une activité complète malgré les symptômes ; Grade 2 = kilométrage hebdomadaire réduit ; Grade 3 = interruption de l'entraînement pendant au moins 2 semaines.

<b>Jungmalm et al.</b> [74]	Etude de cohorte en Suède	1 an Les coureurs devaient maintenir leurs habitudes d'entraînement	Total = 224 coureurs récréatifs 85 jambes blessées	Fonction dynamique : variables cinématiques de l'éversion de l'arrière-pied	Système de capture de mouvement 3D	Sur le sol à une vitesse de 3,33 m/s Chaussures non précisées	Blessures liées à la course « Douleur musculosquelettique liée à la course dans les membres inférieurs ou dans le dos qui entraîne une restriction ou un arrêt de la course (distance, vitesse, durée ou entraînement) dans plus de 66 % de toutes les séances d'entraînement sur deux semaines consécutives ou sur plus de 50 % de toutes les séances d'entraînement en quatre semaines consécutives, ou qui obligent le coureur à consulter un médecin ou un autre professionnel de la santé ».
<b>Kuhman et al.</b> [75]	Etude de cohorte aux Etats-Unis	4 mois Les coureurs devaient suivre leurs entraînements et compétition habituels	Total = 19 coureurs professionnels 10 blessés	Fonction dynamique : variables cinématiques de l'éversion de l'arrière-pied	Système de capture de mouvement 3D	Sur une piste de 25m avec une vitesse de 4,5m/s pour les hommes et 4,0m/s pour les femmes Chaussures personnelles	Blessures liées la course Non précisé
<b>Becker et al.</b> [77]	Etude de cohorte aux Etats-Unis	2 ans Les coureurs devaient suivre leurs entraînements et	Total = 24 coureurs professionnels 7 blessés	Fonction dynamique : variables cinématiques de l'éversion	Système de capture de mouvement 3D	Sur tapis roulant pendant 10 minutes à leur allure d'entraînement, les données ont été	Apparition du syndrome de stress tibial médial Non précisé

		compétition habituels		de l'arrière-pied		enregistré pendant la dernière minute	
<b>Dudley et al.</b> [76]	Etude de cohorte aux Etats-Unis	14 semaines Les coureurs devaient suivre leurs entraînements et compétition habituels	Total = 32 coureurs professionnels 12 blessés	Fonction dynamique : variables cinématiques de l'éversion de l'arrière-pied	Système de capture de mouvement 3D	Sur une piste de 20m à une allure de 3,85m/s Chaussures personnelles	Blessures liées à la course « Plainte musculosquelettique des membres inférieurs ou du dos causée par la course à pied entraînant une restriction de participation à une séance d'entraînement complète »
<b>Perez-Morcillo et al.</b> [72]	Etude cas-témoin en Espagne		Total = 600 coureurs novices 300 blessés / 300 témoins	Posture statique du pied en pronation	Foot Posture Index		Blessures liées à la course « Douleurs musculosquelettiques liées à la course dans les membres inférieurs ou dans le dos qui entraînent une restriction ou un arrêt de la course (distance, vitesse, durée ou entraînement) de plus de sept jours ou de trois entraînements programmés consécutifs, ou qui obligent le coureur à consulter un médecin ou un autre professionnel de la santé. »

Tableau IV. Caractéristiques des études incluses

## 4.2 Biais relatifs aux articles inclus

NEWCASTLE OTTAWA SCALE									
Cohortes	SELECTION /4				COMPARABILITE /2	CRITERE DE JUGEMENT /3			TOTAL /9
	Représentativité des sujets exposés	Sélection des sujets non-exposés	Détermination de l'exposition	Critère de jugement absent	Critère de jugement comparable	Evaluation du critère de jugement	Suivi des groupes	Adéquation du suivi des sujets	
Nielsen <i>et al.</i> 2014	★	★	★	★	★★	★	★		8
Ramskov <i>et al.</i> 2013		★	★	★	★★	★	★	★	8
Messier <i>et al.</i> 2018	★		★	★	★★		★		6
Jungmalm, Nielsen <i>et al.</i> 2020	★		★	★	★★		★	★	7
Kuhman <i>et al.</i> 2016			★	★	★★		★	★	6
Becker, Nakajima and Wu 2018			★	★	★★		★	★	6
Dudley <i>et al.</i> 2017			★	★	★★		★	★	6

Tableau V. Biais évalués par la Newcastle Ottawa Scale

NEWCASTLE OTTAWA SCALE									
Cas-témoïn	SELECTION /4				COMPARABILITE /2	EXPOSITION /3			TOTAL /9
	Définition adéquate des cas	Représentativité des cas	Sélection des témoins	Définition des témoins	Comparabilité du critère de jugement entre les groupes	Vérification de l'exposition	Méthode de vérification de l'exposition	Perdus de vue	
Perez-Morcillo <i>et al.</i> 2018	★		★	★	★★	★	★	★	8

**Rappel de la notation de la NOS :**

**Bonne à haute qualité : 7-9 étoiles**

**Qualité moyenne à bonne : 4-6 étoiles**

**Qualité faible : 0-3 étoiles**

#### a) Biais de sélection

Concernant la représentativité des sujets exposés, les études de **Kuhman et al.**, **Becker et al.** et **Dudley et al.** portent leurs recherches sur des coureurs de la National Collegiate Athletic Association de 1<sup>ère</sup> division en Amérique, ce sont donc des coureurs de haut-niveau et ne sont donc pas représentatifs de la population générale de coureurs. De plus le nombre de coureurs inclus est trop peu élevé ainsi que dans l'étude de **Ramskov et al.** Aucune étoile ne leur a donc été attribuée pour ce critère. **Nielsen et al.**, **Jungmalm et al.** et **Messier et al.** ont porté leur recherche sur de nombreux coureurs novices et récréatifs qui sont plus représentatifs de la communauté.

Concernant la sélection des sujets non-exposés, les articles de **Nielsen and al.**, de **Ramskov and al.** et de **Perez-Morcillo and al.** ont utilisé des sujets non-exposés issus de la même communauté que les sujets exposés, une étoile leur a donc été attribué sur la NOS. La méthodologie des 5 autres articles n'a pas réparti la population en un groupe exposé et un groupe non-exposé et a considéré la population de façon homogène. L'étoile ne leur a donc pas été attribuée.

Concernant la détermination de l'exposition, les articles étudiés ont tous décrit de façon détaillée la méthodologie concernant la mesure de la posture du pied avec l'Index de Posture du Pied ou la prise des mesures des mouvements du pied avec des systèmes de capture tridimensionnelle sur chaque sujet. Une étoile a été attribuée à chacun des articles.

Concernant l'absence du critère de jugement au début de l'étude, chacun des articles n'a inclus que des coureurs étant sains au commencement des recherches. Les critères d'inclusion de cinq de nos études ont même précisé que le coureur ne devait pas avoir présenté de blessures durant les six mois précédents la recherche. Une étoile leur a été attribuée pour ce critère.

#### b) Biais au niveau de la comparabilité

Concernant la comparabilité du critère de jugement, les études incluses étudient toutes les facteurs de risque étudiés qui sont la posture et les mouvements de pronation du pied et elles étudient également d'autres facteurs de risques comme par exemple l'âge, le sexe, l'IMC ou d'autres facteurs biomécaniques et cinématiques liés à l'apparition de blessures lors de la course à pied. Deux étoiles ont été données aux études.

#### c) Biais au niveau des résultats

Concernant l'évaluation du critère de jugement, aucune étude n'a précisé avoir réalisé une évaluation du facteur de risque ou du critère de jugement en aveugle mais un examen médical approfondi par imagerie médicale pouvait être réalisé pour les études de **Ramskov et al.**, **Nielsen et al.** Pour les autres études, l'évaluation de la blessure a été effectuée par l'entraîneur sportif de l'équipe ou un kinésithérapeute lié à l'étude. Aucune étoile ne leur a été attribuée.

Concernant la durée du suivi des groupes, les études de **Ramskov et al.**, **Kuhman et al.** et **Dudley et al.** ont les temps de suivi les plus courts c'est-à-dire 10 semaines ou une saison de cross-country (14 semaines). Cependant nous avons jugé ce temps de suivi adéquate pour notre critère de jugement qui

est l'apparition d'une blessure liée à la course chez le coureur. Toutes les études ont reçu une étoile pour ce critère.

Concernant l'adéquation du suivi des cohortes, l'étude de **Messier et al.** a déclaré un nombre trop important de perdus de vue même si elle a déclaré les raisons de ces pertes de suivi. En effet sur les 300 coureurs recrutés, 48 n'ont pas terminé la période de suivi. De même pour l'étude de **Nielsen et al.** qui ont censuré 197 coureurs durant l'étude pour plusieurs raisons décrites.

Pour l'étude cas-témoins de **Perez-Morcillo et al.**, les biais retrouvés sont décrits dans le tableau de synthèse suivant.

#### Synthèse des biais retrouvés dans chaque étude

Articles	Biais retrouvés
<b>Nielsen et al. 2014</b>	<p><b>Biais de sélection</b> : les participants étaient volontaires, il y a un risque qu'ils possèdent des caractéristiques différentes des personnes refusant de participer.</p> <p><b>Biais d'évaluation</b> : l'évaluation du critère de jugement était réalisée par un kinésithérapeute non-aveuglé aux pieds du participant.</p> <p><b>Biais de résultats</b> : en raison du faible nombre de personnes fortement pronatrices, les résultats doivent être interprétés avec prudence.</p> <p>Il y a de nombreux perdus de vue ou de censure durant le suivi.</p> <p><b>Biais de confusion</b> : les participants pouvaient réaliser les entraînements qu'ils voulaient sans restriction, ceci a pu être un facteur de confusion non-pris en compte par les auteurs et influencer l'apparition du risque de blessures.</p>
<b>Ramskov et al. 2013</b>	<p><b>Biais de sélection</b> : les participants étaient volontaires et ont pu recevoir une montre et une paire de chaussures gratuitement à l'inclusion, certains ont pu se considérer comme novices alors qu'ils ont un niveau récréatif.</p> <p>Si une jambe était blessée le suivi s'arrêtait et l'autre jambe était censurée et n'était plus analysée alors qu'elle était encore à risque.</p> <p>L'étude comprenait un faible échantillon de coureurs fortement en pronation.</p> <p><b>Biais d'évaluation</b> : les évaluations n'ont pas été faites en aveugle et elles ont été réalisées par un kinésithérapeute.</p> <p><b>Biais de confusion</b> : des différences ont été retrouvées dans le poids, la taille et la pointure entre les coureurs blessés et sains.</p>
<b>Perez-Morcillo et al. 2018</b>	<p><b>Biais de sélection</b> : les cas ont été recrutés dans des cliniques de podologie ou kinésithérapie et non de façon aléatoire. Certaines variables d'inclusion ont été auto-déclarées ce qui peut engendrer un biais d'information, cependant l'identification des blessures étaient objectivées par un médecin ou un kinésithérapeute.</p> <p><b>Biais de confusion</b> : Les témoins présentaient une expérience de course statistiquement plus élevée que les cas et peut donc représenter un facteur de confusion.</p> <p><b>Biais de résultats</b> : en raison du faible nombre de personnes fortement pronatrices, les résultats doivent être interprétés avec prudence.</p>



<p><b>Messier et al. 2018</b></p>	<p><b>Biais d'information :</b> les informations d'entraînements étaient auto-déclarées ce qui a pu entraîner un biais d'information non-négligeable.</p> <p><b>Biais de mesure :</b> Les mesures des variables d'exposition n'ont été prises qu'une fois au départ et n'ont pas été remesurées lors du suivi, donc toute variabilité entre le début du suivi et le moment de la blessure n'a pas été évaluée. Le système de mesure tridimensionnelle est fiable pour prédire les mouvements du pied, seulement il n'existe pas de protocole standardisé pour le placement des marqueurs, il y a donc un risque de fluctuation dans les mesures en les plaçant.</p> <p><b>Biais d'évaluation :</b> L'évaluation du critère de jugement n'a pas été fait en aveugle et a été réalisé par le médecin et le kinésithérapeute lié à l'étude.</p> <p><b>Biais de résultats :</b> Nombre de perdus de vue important. Toutes les blessures de surutilisation ont été regroupées ce qui rend difficile de déterminer quel facteur de risque est lié à une pathologie spécifique.</p>
<p><b>Jungmalm et al. 2020</b></p>	<p><b>Biais de sélection :</b> les informations d'entraînements étaient auto-déclarées ce qui a pu entraîner un biais d'information non-négligeable.</p> <p><b>Biais de mesure :</b> Chaque facteur de risque n'a été mesuré qu'une seule fois, donc les changements qui ont pu se produire entre le début du suivi et avant la blessure n'ont pas été mesurés. Utilisation de jours comme échelle de temps, alors qu'une blessure de surutilisation ne peut pas se produire en une journée. Les participants ont quand même été considérés comme étant à risque de se blesser tout au long de l'année.</p> <p><b>Biais d'évaluation :</b> Risque de différence de placement des marqueurs rétro réfléchissants du système de capture de mouvement sur le pied. L'évaluation du critère de jugement n'a pas été fait en aveugle par le médecin.</p> <p><b>Biais de résultats :</b> Les informations sur le suivi des participants étaient déterminées par leur motivation à les soumettre (entraînements, blessures...), il y a eu de nombreux perdus de vue. Faible nombre de blessures retrouvées par rapport aux nombres participants inclus, il n'y a pas assez de puissance pour permettre d'analyser des blessures spécifiques au facteur de risque de pronation.</p>
<p><b>Kuhman et al. 2016</b></p>	<p><b>Biais de sélection :</b> Taille de l'échantillon trop faible et non représentatif de la communauté car ce sont des coureurs professionnels.</p> <p><b>Biais de mesure :</b> Les femmes ont été évaluées avec une vitesse de course plus lente que celles des hommes ce qui peut expliquer les différences de vitesse maximale de pronation entre les groupes.</p> <p><b>Biais d'évaluation :</b> Risque de différence de placement des marqueurs réfléchissants du système de capture de mouvement sur le pied. L'évaluation du critère de jugement n'a pas été fait en aveugle et a été réalisée par l'entraîneur sportif de l'équipe.</p>

	<p><b><u>Biais de résultats</u></b> :</p> <p>Toutes les blessures de surutilisation étaient comprises ce qui rend difficile de déterminer quel facteur de risque est lié à quelle pathologie spécifique.</p> <p><b><u>Biais de confusion</u></b> : il y avait deux fois plus de femmes que d'hommes, ceci peut avoir joué un rôle dans l'apparition de blessures.</p>
<b>Becker et al. 2018</b>	<p><b><u>Biais de sélection</u></b> :</p> <p>Taille de l'échantillon trop faible et non représentatif de la communauté. Les hommes et les femmes n'ont pas été analysés séparément.</p> <p><b><u>Biais d'évaluation</u></b> :</p> <p>Risques de différence de placement des marqueurs du système de capture de mouvement sur le pied. L'évaluation du critère de jugement n'a pas été fait en aveugle et a été réalisée par l'entraîneur sportif de l'équipe.</p> <p><b><u>Biais de confusion</u></b> :</p> <p>Il n'y a pas eu de suivi sur les chaussures utilisées, qui peuvent être également des facteurs de risques de blessures.</p>
<b>Dudley et al. 2017</b>	<p><b><u>Biais de sélection</u></b> :</p> <p>Taille de l'échantillon trop faible et non représentatif de la communauté.</p> <p><b><u>Biais d'évaluation</u></b> :</p> <p>Risques de différence de placement des marqueurs du système de capture de mouvement sur le pied. L'évaluation du critère de jugement n'a pas été fait en aveugle et a été réalisée par l'entraîneur sportif de l'équipe.</p> <p><b><u>Biais de résultats</u></b> :</p> <p>Toutes les blessures de surutilisation ont été regroupées ce qui rend difficile de déterminer quel facteur de risque est lié à quelle pathologie spécifique.</p>

Tableau VI. Synthèse des biais retrouvés

Comme nous venons de le constater de nombreux risque de biais de sélection, d'évaluation ainsi que de confusion sont rencontrés dans les différentes études que nous étudions. Tous ces risques de biais sont à prendre en compte dans l'analyse de nos résultats car ils peuvent venir fausser certaines conclusions.

En résumé, toutes les études ont toutes été notées comme étant des études de bonnes qualités avec des notes entre 6 et 7 étoiles pour les études de **Messier et al.2018, Kuhman et al.2016, Becker et al. 2018, Jungmalm et al.2020.** et **Dudley et al.2017** et de haute qualité avec 8 étoiles pour les études de **Nielsen et al.2014, Ramskov et al. 2013** et **Perez-Morcillo et al.2018.**

### 4.3 Effets des facteurs de risque sur le critère de jugement

De nombreuses études se sont concentrées sur l'étiologie des blessures survenant dans le cadre de la pratique de la course à pied. Plusieurs facteurs de risque sont à l'étude et notamment les facteurs anatomiques et cinématiques concernant les membres inférieurs. Notre revue de littérature se concentre notamment sur le pied qui est la première interface entre le coureur et le sol et notamment sur la pronation de ce dernier.

Etant donné la proportion que représentent les blessures de surutilisation dans les blessures liées à la course ainsi que le nombre limité d'études de cohortes récentes portant spécifiquement sur les blessures de surutilisation, nous avons inclus des études ayant pour critère de jugement l'apparition de blessures liées à la course.

Nous avons analysé les résultats présentés dans chacune des études, s'ils étaient statistiquement significatifs à l'aide de la valeur de  $p$  lorsqu'elle était inférieure à 0,05, lorsque les intervalles de confiance à 95% ne comprenaient pas « 1 » dans leurs bornes ainsi qu'à la taille d'effet représentée par le «  $d$  de Cohen ».

Dans l'étude de **Nielsen et al.**, l'objectif était d'étudier la distance jusqu'à l'apparition d'une blessure liée à la course chez des coureurs débutants avec différentes postures du pied. L'incidence de blessures sur la période d'un an chez les coureurs s'élevait à **17,3%** pour les coureurs aux pieds neutres, **13,1%** pour les pieds en pronation et **33,3%** pour les pieds fortement en pronation. 252 coureurs sur 927 coureurs au total ont subi une blessure liée à la course. Les blessures développées étaient le syndrome de stress tibial médial, le syndrome fémoro-patellaire, le syndrome de la bandelette ilio-tibiale, la tendinopathie d'Achille et d'autres blessures non précisées.

Le risque relatif calculé ne montre pas de résultats significatifs entre les coureurs en pronation et fortement en pronation comparé aux coureurs avec des pieds neutres.

Facteurs de risque	Risque Relatif	IC à 95%
Pied en pronation comparé à un pied neutre	0,89	[0,46 ; 1,73]
Pied fortement en pronation comparé à un pied neutre	2,18	[0,88 ; 5,41]

Les résultats montrent après une analyse multivariée, qu'il n'y pas de différence significative ( $p < 0,05$ ) dans l'apparition d'une blessure liée à la course entre les pieds en pronation et en forte pronation par rapport aux pieds neutres après 50, 100, 250 et 500 kilomètres de course.

Cependant, les coureurs avec un pied en pronation avaient significativement moins de risques de développer une blessure après 1000 kilomètres de course.

Facteurs de risque	Taux d'incidence de blessures à 1000km	Différence de taux d'incidence (%)	IC à 95%	p
Pied neutre	1.0	0 (référence)		
Pied en pronation (FPI : +7 à < +10)	0,63	-0,37	[-0,03 ; -0,70]	<b>0,03</b>
Pied fortement en pronation (FPI : > +10)	3,25	2,25	[-0,35 ; 4,85]	<b>0,09</b>

Tableau VII. Résultats de l'étude de Nielsen et al.

Dans l'étude de **Ramskov et al.** : l'objectif était d'étudier la distance jusqu'à l'apparition d'une blessure liée à la course chez des coureurs débutants avec différentes postures du pied. Après le suivi de 10 semaines, 13 coureurs débutants ont subi une blessure sur 59. La jambe a été utilisée comme unité d'analyse. Parmi les 118 jambes incluses, **16,4%** des jambes ont subi une blessure. Les auteurs ont pris en compte toutes les blessures liées à la course. L'incidence de blessures s'élevait à **15,1%** pour les coureurs aux pieds neutres, **23,5%** pour les pieds en pronation et **75%** pour les pieds fortement en pronation.

Le risque relatif calculé montre des résultats non significatifs. Les résultats montrent après analyse multivariée, qu'aucune différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les coureurs novices avec une posture du pied en pronation et fortement en pronation par rapport aux coureurs novices avec une posture du pied neutre.

Facteurs de risque	Risque relatif	IC à 95%		
Pied en pronation comparé à un pied neutre	1,48	[0,55 ; 3,97]		
Pied fortement en pronation comparé à un pied neutre	Non-calculable	Non-calculable		

Facteurs de risque	Risque relatif cumulé	IC à 95%	p	Erreur standard
Pied en pronation et fortement en pronation comparé à un pied neutre après 125km de course à pied	1,65	[0,65 ; 4,17]	0,29	0,78

Tableau VIII. Résultats de Ramskov et al.

Dans l'étude de **Perez Morcillo et al.** :

L'objectif était d'étudier la relation entre les blessures liées à la course à pied et la posture statique du pied. L'étude a inclus 300 coureurs débutants blessés dans le groupe cas et 300 coureurs débutants sains dans le groupe témoin. Les auteurs n'ont pas donné de précision sur les blessures du groupe des coureurs blessés. Après analyse multivariée, un coureur avec un pied en pronation a 4,80 fois plus de risque de se blesser qu'un coureur avec des pieds neutres. De plus un coureur avec un pied fortement en pronation a 20,2 fois plus de risque de se blesser qu'un coureur avec des pieds neutres.

Facteurs de risque	Odd Ratio (OR)	IC à 95%	p
Pied en pronation comparé à un pied neutre	<b>4,80</b>	<b>[3,15 ; 7,30]</b>	<b>&lt;0,001</b>
Pied fortement en pronation comparé à un pied neutre	<b>20,2</b>	<b>[9,28 ; 43,10]</b>	<b>&lt;0,001</b>

Tableau IX. Résultats de l'étude de Perez-Morcillo et al.

Dans les prochaines études incluses, les auteurs étudient le pied de façon dynamique et nous allons étudier les variables concernant l'éversion qui sont le plus étudiées et en donner une définition :

- le pic maximal d'éversion est l'éversion maximale de l'arrière-pied pendant la phase d'appui.
- la vitesse maximale d'éversion est la vitesse d'éversion instantanée maximale de l'arrière-pied entre la pose du talon au sol jusqu'au pic d'éversion.
- l'amplitude du mouvement d'éversion est la gamme de mouvement de l'arrière-pied à partir du touché du talon jusqu'au pic maximal d'éversion.

- la durée d'éversion est le temps écoulé entre la pose du talon au sol et le pic maximal d'éversion.

Dans l'étude de **Messier et al.** :

Après les deux ans de suivi, l'incidence des blessures était de **66%**. 199 sur 300 coureurs ont développé une blessure de surutilisation. 83% des blessures sont survenues durant la première année et 17% lors de la seconde. Le genou était la région la plus touchée suivie par le pied. Ils étudient le pic maximal d'éversion, la vitesse maximale d'éversion ainsi que l'amplitude de mouvement d'éversion.

Facteurs de risque	Coureurs blessés (n=199)	Coureurs sains (n=101)	p	Taille d'effet (d)
Pic maximal d'éversion (°)	-7,4 ± 3,5	-7,4 ± 3,5	0,94	0
Amplitude du mouvement d'éversion (°)	13,4 ± 3,6	13,8 ± 3,7	0,35	0,11
Vitesse maximale d'éversion (°/s)	-182 ± 61	-186 ± 61	0,59	0,07

Tableau X. Résultats de l'étude de Messier et al.

Les résultats montrent qu'aucune différence statistique (**p < 0,05**) dans les mouvements de l'arrière-pied n'a été retrouvée entre les coureurs blessés et les coureurs sains.

Dans l'étude de **Jungmalm et al.** :

Après un an de suivi, l'incidence de blessures chez les coureurs récréatifs était de **29%**. La jambe était utilisée comme unité d'analyse. Sur 448 jambes, 85 jambes ont été blessés.

Ils étudient la vitesse d'éversion, l'amplitude de mouvement d'éversion et la durée d'éversion. Seule l'augmentation de la **durée d'éversion** a été associée comme facteur de risque dans l'apparition d'une blessure. Pour les autres caractéristiques d'éversion, les résultats n'étaient pas significatifs.

Facteurs de risque	Risque relatif (RR)	IC à 95%	p	Différence de risque cumulée (%)	IC à 95%
Durée de pronation (%)	<b>1,63</b>	<b>[1,05 ; 2,52]</b>	<b>0,033</b>	<b>20,7</b>	<b>[1,3 ; 40,0]</b>
Vitesse de pronation (°/s)	1,01	[0,59 ; 1,73]	0,487	5,4	[-9,8 ; 20,6]
Amplitude de mouvement de pronation (°)	0,98	[0,56 ; 1,70]	0,930	-0,6	[-15 ; 13,7]

Tableau XI. Résultats de l'étude de Jungmalm et al.

Dans l'étude de **Kuhman et al.** :

Après un suivi de 12 semaines, l'incidence de blessures était de **52,6%**. 10 coureurs professionnels ont subi des blessures et 9 coureurs sont restés en bonne santé. Les blessures identifiées étaient la fracture de stress tibial, le syndrome de stress tibial médial, la fasciite plantaire, la tendinopathie d'Achille, le syndrome de la bandelette ilio-tibiale et le syndrome des loges. Ils étudient le pic maximal d'éversion, la vitesse maximale d'éversion, l'amplitude de mouvement d'éversion et la durée d'éversion.

La **vitesse maximale d'éversion** et **l'amplitude du mouvement d'éversion** étaient plus faibles chez les coureurs blessés et le **pic maximal d'éversion** était plus élevé. Pour les autres caractéristiques d'éversion, les résultats n'étaient pas significatifs.

Facteurs de risque	Coureurs sains (n=9)	Coureurs blessés (n=10)	p	Taille d'effet (d)
Pic maximal d'éversion (°)	4,4 ± 4,2	8,1 ± 3,0	<b>0,045</b>	<b>1,05</b>
Vitesse maximale d'éversion (°/s)	478,6 ± 156,5	326,2 ± 94,8	<b>0,021</b>	<b>1,26</b>
Amplitude de mouvement d'éversion (°)	20,4 ± 3,7	16,7 ± 2,5	<b>0,029</b>	<b>1,21</b>
Durée d'éversion (s)	0,075 ± 0,06	0,12 ± 0,05	0,10	0,87

Tableau XII. Résultats de l'étude de Kuhman et al.

Dans l'étude **Becker et al.** :

L'incidence était de **29,0%** après les deux ans de suivi. Sept coureurs sur les vingt-quatre coureurs professionnels étudiés ont développé un syndrome de stress tibial médial. Les facteurs étudiés étaient le pic maximal d'éversion, la vitesse d'éversion, et la durée d'éversion. Un **pic maximal d'éversion** plus élevé et une **durée d'éversion** plus longue ont été associés au groupe de coureurs blessés. Pour la vitesse d'éversion, les résultats n'étaient pas significatifs.

Facteurs de risque	Coureurs sains (n=11)	Coureurs blessés (n=7)	p	Taille d'effet (d)
Pic maximal d'éversion (°)	5,08 ± 1,97	-8,16 ± 2,90	<b>0,034</b>	<b>1,265</b>
Vitesse d'éversion (°/s)	-176,10 ± 44,62	-175,66 ± 58,36	0,987	0,009
Durée d'éversion (%)	55,77 ± 11,27	79,58 ± 9,08	<b>&lt;0,001</b>	<b>2,340</b>

Tableau XIII. Résultats de l'étude de Becker et al.

Dans l'étude de **Dudley et al.** :

A la fin des quatre mois de suivi, 12 coureurs se sont blessés sur un total de 31 coureurs. L'incidence des blessures liées à la course était donc de **38,7%**. Le genou et la jambe étaient les deux régions les plus touchées suivies par la hanche, le pied et la cuisse.

Les facteurs de risques étudiés étaient le pic maximal d'éversion, la vitesse maximale d'éversion et l'amplitude de mouvement d'éversion.

Les coureurs blessés présentent une **vitesse maximale d'éversion** plus élevée que les coureurs sains. Pour les autres caractéristiques d'éversion, les résultats n'étaient pas significatifs.

Facteurs de risque	Coureurs sains (n=19)	Coureurs blessés (n=11)	p	Taille d'effet (d)
Pic maximal d'éversion (°)	6,15 (4,43 ; 7,87)	6,01 (4,50 ; 7,52)	0,910	0,04
Vitesse maximale d'éversion (°/s)	<b>260,93 (212,22 ; 309,64)</b>	<b>359,64 (270,70 ; 448,58)</b>	<b>0,047</b>	<b>0,73</b>
Amplitude de mouvement d'éversion (°)	12,87 (11,03 ; 14,71)	14,41 (13,13 ; 16,69)	0,188	0,46

Tableau XIV. Résultats de l'étude de Dudley et al.

## 5 DISCUSSION

### 5.1 Analyse de l'hétérogénéité

Afin d'être plus concis et éviter les répétitions dans l'analyse des résultats, une description de tous les éléments pouvant être responsables de l'hétérogénéité au niveau des résultats retrouvés sera détaillée ici. Il faudra les prendre en compte afin de ne pas tenir de conclusion hâtive concernant l'interprétation des résultats. En effet, ils peuvent avoir rendu la comparaison entre les études difficile.

#### Au niveau de la population :

La revue porte sur un total de 2186 coureurs qui, même si cela représente un nombre élevé, n'est pas assez représentatif de la communauté de coureurs qui concernent plusieurs millions de personnes à travers le monde. Ainsi nos résultats ne peuvent pas forcément se généraliser à une population plus large de coureurs. Les résultats peuvent avoir été non-significatifs ou à prendre avec du recul en raison d'un nombre insuffisant de coureurs dans certaines des études incluses comme celles de **Ramskov et al.**, **Becker et al.**, **Dudley et al.**, **Kuhman et al.** et **Perez-Morcillo et al.**, ainsi qu'à l'inverse d'un nombre élevé de coureurs qui a engendré la perte de suivies de nombreux participants comme dans l'étude de **Nielsen et al.**

Du point de vue du genre, les études incluses possèdent toutes une population incluant des hommes et des femmes, ce qui permet de généraliser les résultats à une plus grande population. Cependant, aucune des études n'a étudié les deux genres séparément ce qui peut entraîner des biais car il peut exister des différences biomécaniques entre les hommes et les femmes. Ainsi dans l'étude de **Dudley et al.** et **Kuhman et al.** il y avait deux fois plus de femmes dans le groupe des coureurs blessés. Les autres études étaient homogènes.

Du point de vue de l'âge, nos articles présentaient des coureurs ayant un âge moyen allant de 19,0 ans minimum à 42,3 ans maximum ce qui peut être représentatif au niveau de la communauté étudiée car la population de coureurs ainsi que les patients rencontrés peuvent s'étendre à tout âge. D'autre part, cette différence d'âge peut aussi représenter un risque de biais car les coureurs peuvent présenter des différences anatomiques, biomécaniques et cinématiques dû au vieillissement physiologique de leurs structures. Ainsi dans les articles de **Dudley et al.**, **Kuhman et al.** et **Becker et al.** la moyenne d'âge allait de 19,0 à 20,3 ans et dans les études de **Messier et al.**, **Jungmalm et al.** **Perez-Morcillo et al.**, **Nielsen et al.** et **Ramskov et al.** l'âge moyen allait de 37,1 à 42,3 ans.

De plus, les études ont inclus différents niveaux de pratique de la course à pied. Les études **Becker et al.**, **Dudley et al.** et **Kuhman et al.** s'intéressaient à des coureurs collégiaux professionnels de cross-country. Les études de **Nielsen et al.**, **Ramskov et al.** et **Perez-Morcillo et al.** ont inclus seulement des coureurs débutants qui ne pratiquaient pas régulièrement la course à pied. Tandis que les articles de **Messier et al.** et **Jungmalm et al.** s'intéressaient à des coureurs récréatifs qui ont une pratique régulière de la course à pied mais pas à haut niveau. La différence de niveau ne permet pas d'effectuer une comparaison légitime entre les différentes études de par la différence de contraintes appliquées et d'expérience de course à pied. On remarque donc une grande hétérogénéité dans les résultats.

### Au niveau de l'exposition aux facteurs de risque :

Comme nous l'avons déjà soulevé dans l'introduction, la définition du mouvement de pronation n'a pas été établie et sa description n'est pas claire. De nombreux auteurs utilisent le mot « éversion » en parlant de la pronation au niveau de l'arrière-pied et inversement. Les articles analysant la posture statique du pied utilisent le mot pronation pour décrire l'éversion du pied. Les articles analysant les variables dynamiques utilisent tous le mot éversion afin de décrire les mouvements de l'arrière-pied. Un consensus sur la définition des mouvements du pied devrait être établie afin de ne pas porter à confusion.

Dans l'analyse statique du pied, il existe des valeurs seuils auxquelles la pronation est considérée comme excessive mesurées à l'aide du Foot Posture Index (FPI).

Cependant, il n'existe pas de valeurs seuils de mouvements dynamiques considérées comme excessives. Ainsi dans les études de **Messier et al.**, **Kuhman et al.**, **Becker et al.** et **Dudley et al.** les participants n'ont pas pu être classés dans un groupe d'exposés ou non-exposés. Ainsi aucun lien de causalité véritable comme un RR ou un OR ne pourra être établi, seulement des corrélations.

Cette absence de calcul peut ne pas être considérée comme un risque de biais. En effet il ne faudrait peut-être pas chercher de valeurs limites pour chaque mouvement mais plutôt que chaque valeur des variables de pronation soit interprétée dans un cadre multifactoriel en rapport avec les caractéristiques individuelles de chaque coureur.

Seule l'étude **Messier et al.** a utilisé ce modèle multifactoriel en étudiant en même temps les facteurs de risques physiologiques, psychologiques et biomécaniques et les caractéristiques d'entraînements. Ainsi d'autres futures études prospectives devraient se baser sur le même modèle.

De plus, toutes les variables d'exposition n'ont été mesurées qu'une seule fois au début des études or elles peuvent être variables durant la période de suivi et être différentes au moment de la blessure, les résultats peuvent donc être faussés.

### Au niveau de l'outil de mesure du facteur de risque :

**Nielsen et al.2014**, **Ramskov et al.** et **Perez-Morcillo et al.** ont étudié le facteur pronation en analysant le pied en statique à l'aide du Foot Posture Index (FPI), qui est un outil de mesure considéré comme simple, rapide et fiable pour étudier la posture du pied en charge.[78] (Annexe 3). Il est basé sur six critères permettant de classer le pied en cinq catégories en quantifiant le degré auquel le pied est :

- Fortement en pronation lorsque le score est supérieur à 10
- En pronation avec un score allant de 8 à 10
- Neutre avec un score allant de 1 à 7
- En supination avec un score allant de -3 à -1
- Fortement en supination avec un score inférieur à -3.

**Messier et al.**, **Jungmalm et al.**, **Kuhman et al.**, **Dudley et al.** et **Becker et al.** ont, eux, évalué la fonction dynamique de l'arrière-pied à l'aide de système de capture tridimensionnelle de mouvement ainsi que de marqueurs rétro réfléchissants que les évaluateurs ont placé sur les coureurs.

La capture de mouvement ou « Motion Capture » est un système composé de caméras émettant des rayonnements infrarouges qui sont réfléchis par des marqueurs placés sur les participants. La caméra enregistre leurs positions et les transmet à un logiciel informatique chargé de la reconstruction spatiale du mouvement et du calcul des valeurs pour chaque mouvement.[79]



Les caméras avaient des résolutions variées avec différentes fréquences d'échantillonnage entre les différentes études qui peuvent être responsables des différences lors des comparaisons entre elles.

Dans l'analyse dynamique de l'éversion du pied, chaque système de capture de mouvement peut présenter une erreur de mesure dans ses calculs et présenter ainsi un risque de biais dans les résultats rapportés. De plus, les différents placements des marqueurs rétro réfléchissants ont pu être une limitation dans la comparaison de nos résultats. En effet seul **Jungmalm et al.** ont indiqué avoir suivi les recommandations de l'International Society of Biomechanic (ISB) pour le placement des marqueurs sur les repères anatomiques.[80] Les autres études ont seulement indiqué les placements des marqueurs sans préciser leur nombre ou la manière de comment ils avaient choisi de placer leurs marqueurs.

Ainsi nous conseillerons pour les prochaines études prospectives de mettre en place des protocoles de mesures standardisés afin de collecter les futures données et ainsi permettre une meilleure comparaison entre les études.

#### Au niveau des protocoles de mesure :

Toutes les études n'ont pas suivi la même méthode au niveau des protocoles. Dans l'analyse dynamique, dans certaines études comme celles de **Nielsen et al. et Ramskov et al.** les coureurs devaient porter des chaussures neutres, dans les autres ils pouvaient courir avec leurs propres chaussures ce qui a pu modifier certaines variables.

**Messier et al., Dudley et al. et Kuhman et al.** ont analysé les mouvements des participants sur une piste, **Becker et al.** sur un tapis de course, **Jungmalm et al.** sur le sol, ce qui peut faire varier les contraintes subies.

De plus les vitesses testées étaient différentes entre chaque étude, **Messier et al. et Becker et al.** ont testé leur coureur à leur allure d'entraînement et **Dudley et al., Kuhman et al. et Jungmalm et al.** à des vitesses prédéfinies différentes entre les trois études. Cela qui peut représenter une limite dans la comparaison des études car selon la vitesse les contraintes subies ne sont pas les mêmes.

Tous ces paramètres peuvent être responsables de certaines différences biomécaniques et cinématiques observées entre les coureurs.

Les études de **Ramskov et al. et Nielsen et al.** ont utilisé des montres GPS considérés comme une mesure fiable et objective pour suivre la charge d'entraînement. Les coureurs collégiaux de cross-country des trois études sont suivis par leurs entraîneurs qui ont noté leurs entraînements objectivement. Les études de **Jungmalm et al. et Messier et al.** ont utilisé des informations auto-déclarées pour suivre la charge d'entraînement, ceci représentent un risque de biais dans la comparaison des études car les coureurs ont pu falsifier leurs écrits et les auteurs ne pouvaient pas savoir si la survenue de blessures pouvait être liée à des erreurs d'entraînement.

#### Au niveau du critère de jugement principal :

Les 8 articles n'ont pas les mêmes définitions de la blessure liée à la course à pied ce qui peut limiter la comparaison entre les études. Une définition claire des blessures liées à la course est nécessaire pour accroître l'unanimité entre les recherches. Le consensus concernant la définition des blessures liées à la course utilisé dans la partie « Introduction » n'a été utilisé que dans les études de **Perez-Morcillo et al. et Jungmalm et al.**

D'autre part, afin d'inclure plus d'études de cohorte, certains articles avaient pour critère de jugement toutes les blessures liées à la course, ce qui a pu limiter la comparaison entre les articles. L'étude de **Becker et al.** se focalise sur une blessure spécifique qui est le syndrome de stress tibial médial et Messier et al. sur les blessures de surutilisation tandis les six autres études se basent sur n'importe quelles blessures liées à la course. Cela limite la possibilité d'associer l'impact de la pronation du pied sur la physiopathologie d'une blessure spécifique et non sur une autre. Il serait préférable que les études futures analysent les facteurs de risques d'une pathologie en particulier afin de mieux en comprendre sa survenue.

#### Au niveau des durée de suivi :

Les études n'effectuent pas leur suivi sur une même durée, en effet certaines études l'effectuent sur une longue période de suivi, d'autres beaucoup plus courte. **Messier et al.** et **Becker et al.** ont suivi les participants pendant deux ans, **Nielsen et al.** et **Jungmalm et al.** pendant une période d'un an. **Dudley et al.**, **Kuhman et al.** ont effectué une durée de suivi plus courte sur une saison de cross-country, environ 4 mois ou **Ramskov et al.** sur 10 semaines.

Même si une période de dix semaines est suffisante pour être à risque de développer une blessure, la différence de durée de suivi peut être une limite dans la comparaison entre les études. Certaines blessures ont pu apparaître après la période suivie qui s'est avérée courte et donc minimiser les résultats retrouvés. L'étude cas-témoins de **Perez-Morcillo et al.** a étudié des coureurs déjà blessés et ne les a pas suivis sur la durée.

## 5.2 Analyse des résultats

### 5.2.1 Posture statique en pronation du pied comme facteur de risque

Les trois articles étudiant la posture du pied comme facteur de risque ont porté leur étude sur une population de coureurs débutants. Ils ont utilisé le Foot Posture Index comme outil de mesure du facteur.

**Concernant les pieds en pronation**, dans l'article de **Nielsen et al.**, l'objectif était de déterminer si la distance jusqu'à l'apparition de blessures liées à la course variait entre les coureurs novices possédant différentes postures du pied.

Le RR a été calculé et aucune différence significative dans l'apparition d'une blessure liée à la course n'a été trouvée entre les coureurs ayant les pieds en pronation et les coureurs avec des pieds en position neutre (RR=0,89 [0,46 ; 1,73]).

De plus, bien que les résultats montrent une diminution de risque de blessures chez les coureurs pronateurs, aucune différence de risque significative n'a été retrouvée à 50, 100, 250 et 500 kilomètres entre les pieds en pronation et les coureurs avec des pieds neutres. Au contraire, les coureurs avec des pieds en pronation subiraient significativement moins de blessures après 1000 kilomètres de course comparés aux coureurs neutres (**p = 0,03**).

Contrairement à notre hypothèse, ce résultat pourrait indiquer qu'une pronation modérée du pied pourrait être un facteur protecteur. Néanmoins ces résultats sont à prendre avec précaution car le nombre de pieds en pronation blessés est faible comparé aux pieds neutres. Il faudrait faire également attention à la charge d'entraînement et à la fatigue qui peuvent être des facteurs de confusion et qui n'ont pas été pris en compte par les auteurs.

En effet les coureurs possédaient une montre GPS pour quantifier leurs distances mais aucune information n'est donnée sur les volumes d'entraînement réalisés à chaque sortie.

FPI group	Feet (n)	Injured feet (n)	Kilometre at risk	Incidence-rate per 1000 km	Incidence-rate difference (95% CI) per 1000 km	p Value
Highly supinated	53	13	10445	1.24	0.24 (-0.44 to 0.93)	0.49
Supinated	369	66	64070	1.03	0.03 (-0.25 to 0.31)	0.83
Neutral	1292	225	225057	1.00	0 (ref)	
Pronated	122	16	25384	0.63	-0.37 (-0.03 to -0.70)	0.03
Highly pronated	18	6	1846	3.25	2.25 (-0.35 to 4.85)	0.09

Figure 10. Nielsen *et al.*[70]

Les mêmes résultats sont retrouvés dans l'étude de **Ramskov *et al.***, qui a pour but également d'étudier si la distance jusqu'à la première blessure liée à la course varie entre les coureurs novices avec différentes postures de pieds.

Après analyse univariée, aucune différence significative n'a été relevée dans le risque d'apparition de blessures liées à la course entre les coureurs avec un pied en pronation comparés aux coureurs avec des pieds neutres.

Après analyse multivariée, après 125 kilomètres, aucune différence significative du risque relatif cumulé entre les coureurs débutants en pronation et les pieds neutre n'a été retrouvée (RRC = 1,65 [0,65 ; 4,17] p = 0,29)

L'étude de **Perez-Morcillo *et al.*** montre un risque significatif plus élevé de développer une blessure chez les coureurs avec les pieds en pronation comparé aux pieds neutres (**p < 0,001**). Cependant, il s'agit d'un schéma d'étude cas-témoins qui s'avère avoir un moins bon niveau de preuve, en effet il est difficile de savoir si la posture du pied est la cause de la blessure ou la conséquence. De plus, le groupe témoin présentait une expérience de course plus élevée que les cas et utilisait plus d'une paire de chaussures pour courir, ces facteurs n'ont pas été pris en compte et peuvent être des facteurs de confusion. Le nombre de pieds en pronation était faible, ce qui peut traduire une puissance statistique faible et une surestimation ou une sous-estimation de l'effet du facteur de risque.

En conclusion, un faible lien a été relevé entre la posture statique du pied en pronation et le risque de blessures chez les coureurs débutants comparé aux pieds neutres. Les pieds en pronation semblent même subir moins de blessures comparés aux pieds neutres dans l'étude de cohorte de **Nielsen *et al.*** et aucune différence significative n'a été relevé dans l'étude de cohorte de **Ramskov *et al.*** Les deux études de cohortes possèdent un plus grand niveau de preuve et une haute qualité méthodologique (8/9 à la NOS).

**Concernant les pieds fortement en pronation**, dans l'étude de **Ramskov *et al.***, le risque relatif cumulé n'a pas été rapporté en raison du nombre très faible de coureurs fortement en pronation comparés au groupe aux pieds neutres. En effet seulement quatre coureurs faisaient partis du groupe fortement pronés. Aucune comparaison n'a donc été faite entre ce groupe et le groupe de référence des coureurs neutres.

Dans l'étude de **Nielsen *et al.***, la tendance rapportait un risque de blessures plus élevé chez les coureurs fortement en pronation comparé aux pieds neutres mais les résultats ne sont pas significatifs (p = 0,09). Le nombre de pieds fortement en pronation est également très faible (n=18) qui traduit une faible puissance statistique et un risque d'une mauvaise estimation de l'effet. Aucune preuve établie concernant les pieds fortement en pronation comparés aux pieds neutres n'a donc été fournie.

L'étude de **Perez-Morcillo et al.** retrouve un risque significativement plus élevé chez les coureurs avec un pied fortement en pronation comparé aux coureurs aux pieds neutres ( $p < 0,001$ ).

Comme nous l'avons précisé c'est une étude cas-témoins donc la causalité entre la pronation du pied et l'apparition de la blessure est difficile à établir car elle inclut des coureurs déjà blessés. Cela peut représenter un risque élevé de biais.

En conclusion, seule l'étude cas-témoins montre significativement un risque de blessures plus élevé comparé aux pieds neutres. Des preuves très limitées concernant un lien de causalité entre les pieds fortement en pronation et l'apparition du risque de blessure ont donc été retrouvées. D'autres études de cohortes avec un échantillon plus élevé de pieds fortement en pronation sont donc nécessaires pour déterminer s'ils sont plus à risque de blessures.

D'après une étude réalisée en 2010, le FPI peut être considéré comme peu coûteux, valide et fiable. Elle a analysé sa valeur prédictive de la fonction dynamique du pied, qui montre une corrélation forte ( $r=0,92$ ,  $p=0,05$ ) entre le score FPI et l'analyse dynamique de l'éversion maximale de l'arrière-pied. [81]. Cependant, des études plus récentes ont trouvé que la fonction statique et les items du FPI n'étaient pas corrélés avec la fonction dynamique et la cinématique du pied pendant la marche ou la course. [82] Nos résultats peuvent donc être limités car la posture statique ne reflèterait pas les conditions de la course à pied.

Il serait donc préférable de conseiller, lorsque les installations et le budget le permettent, d'étudier le pied dans sa fonction dynamique lors d'études étiologiques sur des facteurs de risques de blessures afin de se rapprocher le plus possible du geste sportif.

**Messier et al., Jungmalm et al., Kuhman et al., Dudley et al. et Becker et al.** ont donc analysé la position du pied pendant la course à l'aide de système de capture tridimensionnelle de mouvement pour étudier la dynamique du mouvement de pronation.

### 5.2.2 Paramètres dynamiques de la pronation du pied comme facteurs de risque

Actuellement, il n'existe pas de consensus sur une ou plusieurs valeurs cinématiques seuils de mouvements d'éversion et donc de pronation du pied considérées comme excessives pour la population. Nos articles n'ont donc pas classé les coureurs blessés ou non blessés dans des sous-groupes exposés ou non exposés au facteur de risque qui est le mouvement de pronation du pied. Ainsi les calculs du RR ainsi que de son intervalle de confiance, nécessaires pour prouver cliniquement les résultats, n'ont pas été possible.

Seule l'étude de **Jungmalm et al.** a défini un groupe avec des valeurs de références pour chaque paramètre d'éversion et a ainsi pu classer un groupe ayant des mesures supérieures à ces références et un groupe ayant des mesures inférieures.

La quantité jugée excessive et les effets ont tout de même été analysé grâce aux différences de moyennes entre les deux groupes et à leurs intervalles de confiance ainsi qu'à la valeur de  $p$  et la taille de l'effet ( $d$  de Cohen) considérés comme importants ou non. Nous avons également réalisé une comparaison quantitative entre les différents articles comparables entre eux avec des « Forest Plots ».

### 5.2.2.1 Pic maximal d'éversion

Les cinq articles inclus avaient tous pour critère de jugement l'apparition d'une blessure liée à la course à pied. Ils ont mesuré les paramètres biomécaniques et cinématiques du pied à l'aide de système de capture tridimensionnelle de mouvement. Les cinq études ont étudié le lien entre un pic maximal d'éversion et le risque de blessures liées à la course.

L'étude de **Kuhman et al.** portaient sur l'apparition de blessures liées à la course développées par les coureurs professionnels de la NCAA1. Les blessures déclarées à la fin du suivi étaient la fracture de stress tibial, le syndrome de stress tibial médial, la fasciite plantaire, la tendinopathie d'Achille, le syndrome des loges et le syndrome de la bandelette ilio-tibiale.

Les coureurs blessés avaient un pic maximal d'éversion du pied plus élevé de **3,70°** que celui des coureurs non-blessés. Les résultats sont statistiquement significatifs avec un IC 95% [0,39 ; 7,01] avec **p = 0,045** avec une forte taille d'effet (**d = 1,05**).

L'étude de **Becker et al.** portait également sur les coureurs professionnels de la NCAA1, la blessure étudiée était l'apparition du syndrome de stress tibial médial.

Les coureurs blessés présentaient également un pic d'éversion plus élevé de **3,08°** que les coureurs non-blessés. Les résultats sont significatifs avec un IC à 95% [0,64 ; 5,52], **p = 0,034** et une taille d'effet considérée comme très large (**d=1,265**).

L'étude a également révélé que le pic d'éversion de l'arrière-pied est fortement corrélé à la durée de l'éversion ( $r = -0,681$ ,  $p < 0,001$ ) que nous allons étudier par la suite.

**Becker et al.** émettent comme hypothèse qu'une position plus importante de l'éversion du pied lors de la phase de soutien entrainerait une tension accrue des muscles responsables du développement du syndrome de stress tibial médial comme le tibial postérieur, le long fléchisseur des orteils ou encore le soléaire. Ils entraineraient des plus grandes forces de traction sur le tibia ou comme énoncé dans la partie « Introduction », la tension appliquée sur les tendons pourrait provoquer des enthésopathies responsables du syndrome de stress tibial médial.

De plus, la rotation interne du tibia est associée à la pronation du pied lors de l'éversion pendant l'appui. La rotation interne fémorale compensatoire pourrait engendrer des contraintes sur le genou. Ce couplage articulaire et musculaire pourrait être l'explication de cette variété de blessures liées à la course.

Les résultats sont à considérer avec prudence car les études possèdent un petit échantillon de coureurs professionnels de cross-country au cours d'une saison qui est une période relativement courte et ne sont donc pas généralisables à une plus large population.

Les études de **Messier et al.** concernant des coureurs récréatifs et **Dudley et al.** concernant également des coureurs professionnels de cross-country ne retrouvent aucune différence significative entre l'augmentation du pic maximal d'éversion entre le groupe de coureurs blessés et le groupe de coureurs sains. La non-significativité de l'étude de **Messier et al.** n'est pas négligeable du fait de sa grande taille d'échantillon et sa bonne qualité méthodologique, d'autres études seraient nécessaires concernant des coureurs récréatifs afin d'étudier ce facteur.

Ces études ont permis de mettre en avant plusieurs résultats encourageants quant à la place de l'augmentation du pic maximal d'éversion de l'arrière-pied et l'apparition de blessures liées à la course chez des coureurs professionnels. L'étude de **Kuhman et al.** concernant plusieurs pathologies

de surutilisation, ce qui ne nous permet pas de savoir comment les mouvements de l'arrière-pied influent sur la physiopathologie de chaque blessure. L'étude de **Becker et al.** étudiait spécifiquement l'apparition du syndrome de stress tibial médial.

Cependant, ces résultats concernent une petite population de coureurs pratiquants la course à pied à un haut niveau, d'autres études de cohortes spécifiques à un niveau de pratique et concernant une plus large population de coureurs seraient utiles afin d'appuyer ces données.

### Comparaison entre les études :

Une méta-analyse a été effectuée entre les trois articles étudiant les coureurs collégiaux professionnels car ils utilisaient les mêmes tests d'associations et concernaient la même population de coureurs professionnels. Cette combinaison des résultats permet d'obtenir une estimation globale de l'effet.

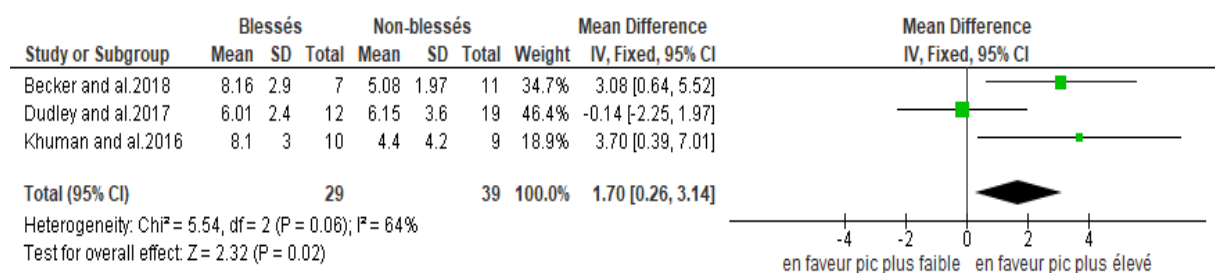


Figure 11. Forest plot concernant le pic maximal d'éversion

La comparaison entre ces études indiquerait un pic maximal d'éversion plus élevé de 1,70° dans le groupe de coureurs blessés professionnels : **Différence de moyenne : 1,70 [0,26 ; 3,14]**.

L'intervalle de confiance [0,26 ; 3,14] qui est représenté par le losange noir sur le graphique ne croise pas l'axe et il ne comprend la valeur 0. De plus la valeur Z donne une indication de l'importance de la différence et elle doit être supérieure à 1,96 pour être significative. Dans le forest-plot, la valeur Z = 2,32 et la valeur de p = 0,02 sont statistiquement significatives.

Néanmoins, l'hétérogénéité I<sub>2</sub> = 64% est considérée comme forte, ce qui peut s'expliquer par la non-significativité de l'étude de **Dudley et al.**, le faible nombre d'études et leurs petits échantillons. Il faut alors prendre ces résultats avec du recul car la puissance statistique n'est peut-être pas suffisante pour que les résultats soient généralisés à une plus grande population. La différence de pic maximal d'éversion est significative entre les coureurs blessés et sains.

#### 5.2.2.2 Durée d'éversion

Seules trois des cinq études ont évalué la durée d'éversion comme facteur de risque d'apparition de blessures liées à la course.

L'étude **Becker et al.** a signalé une durée d'éversion plus longue chez les coureurs professionnels qui ont développé un syndrome de stress tibial médial par rapport aux coureurs non-blessés (**p < 0,001**) ainsi que d'une taille d'effet considérée comme immense (**d = 2,340**).

L'analyse multivariée a montré significativement que la durée de l'éversion était prédictive d'appartenir aux groupes de coureurs blessés. Ainsi une augmentation de 1% de la durée d'éversion augmentait les chances d'être dans le groupe de coureurs atteint du syndrome de stress tibial médial de **1,38** (IC 95% : [0,89 ; 2,14] et **p = 0,015**).

Comme énoncé dans l'introduction, ces résultats peuvent s'expliquer par le fait qu'une durée prolongée d'éversion et donc de pronation laisse le pied dans une position plus flexible au lieu de se placer comme un levier rigide lorsque le coureur amorce sa phase d'impulsion. La stabilisation par les muscles intrinsèques et extrinsèques devra alors être plus importante afin de stabiliser le pied. Ainsi les forces musculaires plus importantes appliquées au tibia augmenteraient les contraintes sur l'os à chaque foulée.

Pour **Jungmalm et al.**, la durée de l'éversion maximale était également la variable statistiquement significative trouvée entre les coureurs récréatifs blessés et non-blessés. En effet, les coureurs du groupe avec des valeurs de mouvement d'un écart-type au-dessus de groupe de référence (qui ont un temps d'éversion plus long) ont **20,7%** plus de risques de blessures que le groupe de référence (IC 95% [1,3 ; 40,0] avec **p = 0,033**).

Les auteurs évoquent une hypothèse comme quoi la corrélation entre la durée d'éversion et l'apparition du risque de blessures liées à la course pourrait être associée à un contrôle moteur insuffisant des muscles extrinsèques et intrinsèques du pied. En effet, ils permettent de freiner le mouvement d'éversion du pied par leurs contractions excentriques et de ramener le pied en position d'inversion pendant la phase de poussée.

Dans l'étude de **Kuhman et al.**, la durée d'éversion n'était pas significativement différente entre le groupe de coureurs professionnels qui s'étaient blessés et le groupe de coureurs sains. La tendance était tout de même à la limite de la significativité pour une plus grande durée d'éversion chez les coureurs qui ont développé une blessure liée à la course avec  $p = 0,10$ .

Ce résultat pourrait s'expliquer par la puissance statistique trop faible et par la petite taille de l'échantillon qui n'était pas suffisante pour observer une différence significative. En effet les auteurs précisent n'avoir réalisé aucun test de puissance statistique concernant la taille de leur échantillon. L'étude portait sur une équipe professionnelle de cross-country collégiale afin de s'assurer que les coureurs pratiquent le même entraînement durant le suivi, l'échantillon s'est donc limité au nombre de coureurs de l'équipe. De plus, dans cet article la durée d'éversion était exprimée en seconde contrairement aux articles de **Kuhman et al.** et **Jungmalm et al.** où elle était en pourcentage.

Un niveau de preuve modéré concernant la durée d'éversion dans le risque de blessures a été retrouvé. En effet, deux études avec une bonne qualité méthodologique (6/9 et 7/9 à la NOS) retrouvent un lien significatif entre une durée du mouvement d'éversion plus longue et le risque de blessures chez des coureurs récréatifs et professionnels. Néanmoins, de par le peu d'études incluses, la petite tailles échantillons et les différences de niveau, les résultats doivent être interprétés avec prudence. Par conséquent, nous recommandons de réaliser d'autres études de cohortes et sur un plus grand échantillon de coureurs et avec un niveau de pratique commun afin de confirmer ces résultats.

### 5.2.2.3 Vitesse d'éversion

L'étude de **Messier et al.** a retrouvé une vitesse d'éversion plus faible chez les coureurs récréatifs qui ont développé des blessures de surutilisation. Cependant aucune différence statistiquement significative n'a été retrouvée entre le groupe blessés et le groupe non-blessés.

Il en est de même dans l'étude de **Becker et al.**, aucune différence significative n'a été rapportée entre les coureurs blessés et non blessés. Les coureurs blessés avaient une vitesse d'éversion légèrement plus faible que les coureurs sains. (MD = -0,44 IC 95% [-51,08 ; 50,20] avec  $p = 0,987$ ) avec une taille d'effet considérée comme très faible ( $d = 0,009$ ).



L'étude de **Kuhman et al.** retrouve les mêmes résultats mais de manière significative, avec une vitesse d'éversion plus élevée chez les coureurs professionnels sains et une vitesse d'éversion plus basse chez les coureurs ayant développé une blessure.

Les résultats sont significatifs ( $p = 0,021$ ) et la taille d'effet est considérée comme très large ( $d = 1,26$ ). L'hypothèse selon les éléments cités en « Introduction », serait qu'une plus grande vitesse d'éversion pourrait permettre aux coureurs de revenir plus rapidement dans une position du pied plus rigide et donc plus stable afin d'éviter toutes surcharges musculaires ou articulaires.

Contrairement aux résultats précédents, les deux études suivantes retrouvent des résultats contradictoires avec une vitesse d'éversion plus élevée chez les coureurs blessés.

En effet dans l'étude de **Dudley et al.**, les coureurs professionnels de cross-country collégiaux qui ont subi une blessure présentaient une vitesse d'éversion significativement plus élevée que les coureurs non-blessés (MD = 98,71 [7,40 ; 190,02] avec  $p = 0,047$ ) et une taille d'effet modérée ( $d = 0,73$ ).

Dans l'étude **Jungmalm et al.**, les coureurs avec une vitesse d'éversion plus élevées que les valeurs de références semblent subir plus de blessures que le groupe de référence correspondant cependant les résultats ne sont pas significatifs.

Les résultats des cinq études sont contradictoires et ne permettent donc pas de prédire l'effet de la vitesse d'éversion dans le risque de blessures chez les coureurs. Ils peuvent être contradictoires en raison des éléments cités dans la partie 5.1 concernant l'hétérogénéité de nos études et les risques de biais individuels des études. En effet, la taille limitée des échantillons, les différences dans les blessures subies par les athlètes ou les différences dans les protocoles testés ainsi que par la différence de niveau entre les coureurs ont pu rendre les résultats contradictoires.

### Comparaison entre les études :

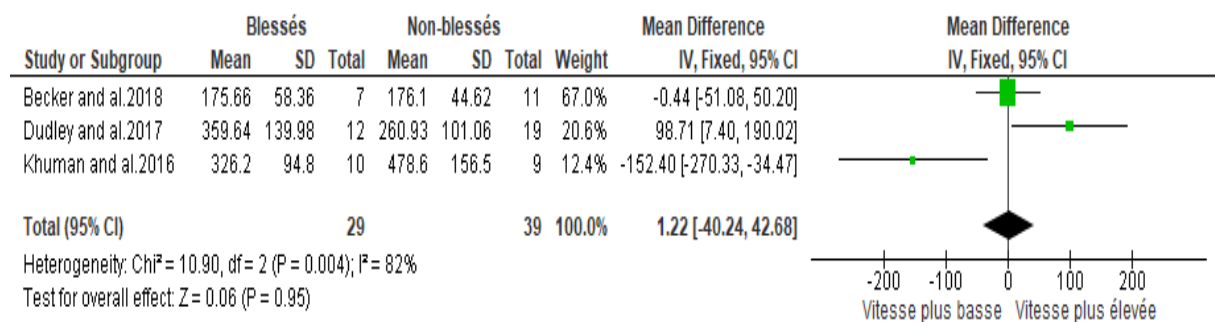


Figure 12 Forest plot concernant la vitesse d'éversion

L'analyse quantitative des études concernant les coureurs professionnels indiquerait une vitesse d'éversion plus élevée de 1,22°/s chez les coureurs qui ont subi une blessure liée à la course.

Or, l'intervalle de confiance [-40,24 ; 42,68] est très large et il croise l'axe de référence et comprend la valeur 0 ce qui signifie que les résultats ne sont pas significatifs. La valeur  $Z = 0,06$  est quasi-nulle et non significative ( $p = 0,95$ ).

L'hétérogénéité très élevée ( $I_2 = 82\%$ ), peut s'expliquer par les résultats contradictoires, le faible nombre d'études et une taille d'échantillon peu élevée. La différence de vitesse d'éversion entre les coureurs blessés et non-blessés n'est donc pas statistiquement significative entre les coureurs professionnels blessés et sains.



#### 5.2.2.4 Amplitude totale d'éversion dans le risque de blessures

Dans l'étude de **Jungmalm et al.**, les coureurs récréatifs ayant une plus faible amplitude mouvement d'éversion ou une amplitude de mouvement plus élevée que le groupe référent semblent subir moins de blessures.

L'incidence de blessures dans le groupe de référence était de 30,8%.

L'incidence de blessures dans le groupe ayant des valeurs inférieures au groupe référent (amplitude d'éversion plus faible) était de 21,5%.

L'incidence de blessures dans le groupe ayant des valeurs supérieures au groupe référent (une amplitude d'éversion plus élevée) était de 30,2%.

Les différences de risques sont donc plus faibles entre les coureurs avec une amplitude d'éversion plus faible et le groupe référent et entre les coureurs avec une amplitude d'éversion plus élevée et le groupe de référence mais les résultats ne sont pas significatifs car les intervalles de confiance contiennent 0 et les valeurs de  $p$  ne sont pas significatives avec  $p = 0,272$  et  $p = 0,930$  respectivement.

**Dudley et al.** retrouvent une amplitude totale d'éversion plus élevée de  $1,54^\circ$  chez les coureurs blessés mais les résultats ne sont pas significatifs car l'intervalle de confiance 95% [-0,76 ; 3,84] contient 0 et  $p = 0,188$  malgré une taille d'effet modérée ( $d = 0,46$ ).

Au contraire dans l'étude de **Messier et al.**, on retrouve une amplitude de mouvement d'éversion plus faible de  $0,40^\circ$  chez les coureurs blessés mais aucune différence statistiquement significative n'a été retrouvée. L'intervalle de confiance à 95% [-1,28 ; 0,48] contient 0 et  $p = 0,35$ . De plus la taille d'effet calculée est très faible ( $d = 0,11$ ).

De même, dans l'étude de **Kuhman et al.**, les auteurs ont retrouvé que les coureurs blessés avaient une amplitude totale de mouvement d'éversion significativement diminuée de  $3,70^\circ$  comparée aux coureurs non blessés avec  $p = 0,029$  et une taille d'effet considérée comme très large ( $d = 1,21$ ).

La réduction de l'amplitude de mouvement d'éversion dans le groupe de coureurs blessés pourrait être dû à un manque d'activation des muscles éverseurs afin d'amener le pied de la position de supination vers la position d'éversion. Cela augmenterait la rigidité du pied dans le plan frontal et donc la nécessité d'adaptation des articulations sus ou sous-jacentes qui pourrait être responsable du développement des blessures. Il serait pertinent d'étudier les amplitudes de mouvement des autres articulations, comme le genou ou la hanche dans le groupe des coureurs blessés.

Cette interprétation doit être envisagée avec du recul car une seule étude montre des résultats significatifs et les résultats des autres études sont contradictoires dû aux différences retrouvées entre les études et détaillées dans la partie 5.1 et les risques de biais de chaque étude. Il est donc impossible d'affirmer qu'une amplitude totale de mouvement d'éversion plus faible soit liée au risque de blessures liées à la course. D'autres études sont nécessaires afin d'étudier ce facteur de risque.

### Comparaison entre les études :

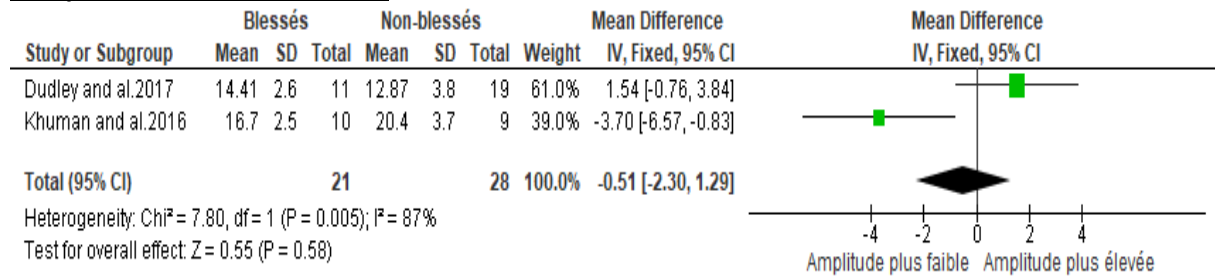


Figure 13 Forest plot concernant l'amplitude totale d'éversion

Ce Forest plot indiquerait une baisse d'amplitude totale de mouvement d'éversion de 0,51° chez les coureurs blessés professionnels comparés aux coureurs en bonne santé.

L'intervalle de confiance se trouve de part et d'autre de l'axe de référence [-2,30 ; 1,29]. L'effet est faible (Z = 0,55) et non significatif (p = 0,58).

L'hétérogénéité est encore plus élevée que les facteurs étudiés précédemment car il n'y a que deux études incluses, elles présentent des résultats contradictoires et il y a toujours un faible nombre de coureurs étudiés. On ne peut donc pas affirmer qu'une différence d'amplitude de mouvement totale d'éversion soit liée à l'apparition de blessures de surutilisation chez les coureurs.

#### 5.2.3 Limites des résultats

L'étude de ces variables de mesure de la pronation peut apporter un élément de réponse en plus dans l'étiologie et la compréhension du mécanisme de blessures. Cependant, il est certain que de nombreux facteurs influent sur l'apparition de blessures liées à la course à pied.

Une limite à nos résultats est que le terme de pronation excessive ne soit pas bien défini dans la littérature. Chaque coureur peut posséder des différences anatomiques et biomécaniques physiologiques. Ainsi un coureur peut posséder son propre seuil spécifique de mouvements excessifs. Dans les prochaines études, une meilleure méthode pour définir une pronation excessive pourrait être de mesurer passivement l'amplitude de mouvement disponible de pronation pour chaque coureur puis d'analyser les différentes variables activement lors de la course et observer s'il atteint son propre seuil, en combien de temps etc.

De plus l'apparition de blessures est toujours multifactorielle. En effet, les coureurs possèdent tous des différences biomécaniques, ces dernières n'entraîneront peut-être pas forcément plus de blessures si elles ne sont pas soumises à d'autres facteurs de risques. D'autres variables devraient être étudiées en tant que facteurs de risques comme certains pris en compte dans les articles de cette revue :

- **Le sexe**, les femmes subissent un taux de blessures plus élevée que les hommes d'après les études de **Messier et al.**, **Nielsen et al.** et de **Ramskov et al.**
- **L'âge**, les études incluses ne trouvent aucune association.
- **L'IMC**, les coureurs blessés possèdent un IMC plus élevé dans le groupe de coureur blessés dans l'étude de **Perez-Morcillo et al.**
- **Le poids**, les coureurs blessés possèdent un poids plus élevé comparés aux coureurs sains d'après l'étude de **Messier et al.**, de **Ramskov et al.** et **Kuhman et al.**
- **La taille**, les coureurs blessés sont plus grands que les coureurs sains d'après l'étude de **Ramskov et al.**

- **Facteurs psychosociaux** : l'étude de **Messier et al.** a retrouvé une santé mentale plus affaiblie et des pensées plus négatives chez les coureurs blessés.
- **Les blessures antérieures** : l'étude de **Messier et al.** et de **Nielsen et al.** ne retrouvent aucune association.
- **L'expérience de course**, les coureurs sains présentaient une plus grande expérience de course que les coureurs blessés dans l'étude de **Perez-Morcillo et al.**
- **Le kilométrage hebdomadaire** : **Messier et al.** et **Becker et al.** ne retrouvent pas d'association.
- **La force musculaire** : **Becker et al.** et **Jungmalm et al.** retrouvent des muscles abducteurs de hanche plus faibles chez les coureurs blessés que sains.
- **Les chaussures** : les coureurs sains utilisaient plus de paires de chaussures comparés aux coureurs blessés.

De plus, le pied ne doit pas être considéré comme une structure à part entière, la littérature a décrit les différents liens que pouvaient avoir les mouvements du pied sur les segments sus-jacents et sous-jacents. Cette revue s'est intéressée à une structure précise qui est le pied. Cependant, il serait pertinent d'étudier les différences biomécaniques et cinématiques également au niveau de la hanche et du genou et l'interaction entre ces différentes articulations. Il pourrait être intéressant de remonter jusqu'au tronc afin de ne pas se focaliser sur qu'une seule partie du corps mais de mieux comprendre la physiopathologie des blessures.

Conclusion : l'hétérogénéité des études a pu mener au manque de cohérence entre les différents résultats. Ces contradictions créent une limite pour savoir si un lien entre la pronation du pied et le risque de blessures liées à la course existe. Contrairement à notre hypothèse la posture du pied en pronation ne semble pas être un facteur de risque de blessures liées à la course chez des coureurs débutants et des preuves insuffisantes et très limitées concernant les pieds fortement en pronation ont été relevées. Concernant les vitesses maximales d'éversion et l'amplitude du mouvement d'éversion, les résultats contradictoires ne nous permettent pas d'établir une corrélation. Un pic maximal d'éversion plus élevé semble être plus présent chez les coureurs professionnels blessés et une durée d'éversion plus longue chez les coureurs blessés récréatifs et professionnels mais ces résultats doivent être pris avec du recul. De plus, de nombreux facteurs non-étudiés dans cette revue sont à prendre en compte dans l'étiologie des blessures afin d'améliorer la cohérence entre les études. Toutes les différences inter-études ont été prises en compte dans l'analyse.

### 5.3 Applicabilité des résultats en pratique clinique

L'augmentation croissante du nombre de coureurs nécessite une attention particulière sur l'apparition des blessures car son nombre s'accroît parallèlement. Rappelons que près de 50% des coureurs subissent chaque année une blessure.[83]

L'identification des facteurs de risque de blessures des membres inférieurs est donc une nécessité pour la pratique clinique et la recherche dans le monde du sport. Elle peut permettre l'élaboration de stratégies de prévention ou de traitements plus efficaces. En effet la prévention, qu'elle soit primaire secondaire ou tertiaire, est un rôle clé de notre profession<sup>2</sup>. De nombreuses techniques et outils sont disponibles pour les kinésithérapeutes afin de prévenir ou d'améliorer la prise en charge des patients et de rééduquer au mieux le corps au geste sportif et à la reprise de la course.

L'objectif de ce mémoire était d'étudier s'il existe un lien entre la posture ou les caractéristiques de mouvement de pronation et le risque d'apparition de blessures des membres inférieurs.

---

<sup>2</sup> <https://www.ordremk.fr/actualites/kines/les-kinesitherapeutes-acteurs-majeurs-de-la-prevention/>

### Mise en pratique des résultats :

Les études concernant la posture statique ont porté sur un grand nombre de coureurs débutants, ils pourront être représentatif de la population retrouvée en pratique clinique. Deux études étudiant la fonction dynamique du pied ont surtout ciblé leurs études sur des coureurs récréatifs qu'on pourrait également rencontrer régulièrement. Cependant, trois études ont ciblé un petit nombre de coureurs professionnels qui seront moins représentatifs de la communauté retrouvée en cabinet. Nous avons remarqué que des résultats peuvent différer selon les niveaux de pratique.

Les résultats contradictoires, les intervalles de confiance et les valeurs p parfois non significatifs n'ont pas permis de tirer des conclusions claires quant aux résultats.

Cette revue apporte des preuves très limitées concernant la posture du pied en pronation et sa fonction dynamique et le risque de blessures liées à la course. Il serait intéressant de rechercher si les chaussures ou les semelles correctrices chez les coureurs avec des pieds en pronation sont efficaces pour corriger l'alignement ou prévenir le risque de blessures. Une correction en position neutre pourrait ne pas suffire pour prédire les mouvements dynamiques du corps. Les données de la littérature sur le sujet divergent, un essai clinique randomisé sorti en 2022 montre que les semelles ne préviennent pas l'apparition de risque de blessures liées à la course, même si elles augmentent la sensation de confort.[84] Dans une ère où la sur-médication est de mise, il conviendrait d'être prudent dans la prescription et dans le maintien de croyances qui ne sont pas prouvées scientifiquement.

D'autre part, malgré des résultats limités et un faible échantillon de coureurs, nous avons remarqué que certains paramètres dynamiques comme la durée d'éversion ou le pic maximal d'éversion pouvaient avoir un lien significatif et de grandes tailles d'effets dans le risque de blessures. Le lien des variables des mouvements de l'arrière-pied chez les coureurs blessés reste plausible. L'analyse dynamique du pied semble donc plus légitime car elle reproduit le geste sportif et peut avoir une relation plus forte, bien que contradictoire, dans le risque de blessures dans cette revue de littérature. Elle peut être donc être favorisée lors de l'examen clinique.

L'analyse tridimensionnelle utilisée comme méthode de mesure dynamique est considérée comme le gold-standard dans l'analyse biomécanique du mouvement.[79] En pratique libérale, son coût et le temps nécessaire à son utilisation ne permettent pas toujours aux kinésithérapeutes d'en posséder. De nouveaux systèmes de capture de mouvements bidimensionnels sont plus accessibles et simples d'utilisation malgré le peu d'études concernant la corrélation entre les deux méthodes de mesure.[79] Ils pourraient permettre aux kinésithérapeutes de repérer ces facteurs lors du bilan.

D'après certaines hypothèses suggérées dans la partie « Introduction » et dans les articles inclus, l'analyse de la biomécanique de la course montrant une durée ou un pic d'éversion plus élevés pourraient mettre en évidence un mauvais contrôle moteur ou une faiblesse des muscles extrinsèques et intrinsèques du pied. Ils pourraient être responsables de la mauvaise cinématique de ce dernier.

Un essai clinique randomisé paru en avril 2022[85] a étudié l'efficacité d'un programme d'exercices de la base du pied de huit semaines [86] sur la cinématique du pied et de la cheville pendant la course à pied et notamment sur les facteurs biomécaniques des coureurs.

Ils étaient répartis aléatoirement entre un groupe témoin réalisant des étirements des membres inférieurs et un groupe d'intervention réalisant un programme d'entraînement des muscles du pied et de la cheville trois fois par semaine pendant huit semaines. (Annexe 4). Les facteurs cinématiques et cinétiques ont été capturés lors sur tapis roulant avant et après l'intervention.

Les résultats montrent des changements statistiquement significatifs dans la biomécanique du pied. Les coureurs du groupe d'intervention présentaient une augmentation de leur mouvement d'inversion de l'arrière pied ( $p=0,037$ ) comparés aux coureurs du groupe de contrôle. De plus les coureurs ayant réalisés le programme de renforcement présentaient une diminution significative de l'affaissement de l'arche longitudinal médial ( $p=0,024$ ).

Il serait donc intéressant d'effectuer d'autres recherches concernant la mise en place du renforcement musculaire dans la prévention ou le traitement des coureurs présentant une blessure liée à la course à pied et une cinématique du pied altérée.

De plus, il est important que les kinésithérapeutes tiennent compte d'autres facteurs de risques plausibles comme le sexe, l'âge, l'IMC, l'expérience de course ou encore la charge d'entraînement car les survenues de blessures sont toujours multifactorielles.

Bien que les facteurs anthropométriques comme l'âge ou le sexe ne soient pas modifiables, l'amélioration de la charge d'entraînement peut l'être. L'apparition de blessure liée à la course se produit le plus souvent à cause d'une mauvaise gestion du stress mécanique appliqué sur les tissus et articulations. En soumettant son corps à des forces plus élevées que son seuil d'adaptation, le risque de se blesser est important.

Le rôle du kinésithérapeute va être d'accompagner le coureur dans la quantification de ce stress. Que ce soit dans la prévention ou le traitement d'une blessure, il faudra expliquer au patient de reprendre la course à pied progressivement pour éviter une tension trop élevée appliquée sur les structures musculosquelettiques. Le kinésithérapeute pourra guider le patient sur la progression de ses entraînements que ce soit sur leurs intensités, leurs volumes, la surface d'entraînement ou encore le dénivelé. [87]

Néanmoins, c'est en écoutant ses propres sensations que le coureur arrivera à quantifier son stress mécanique. Si lors de la reprise de la course ou d'un entraînement, des douleurs surviennent ou bien le lendemain avec plus ou moins de raideurs matinales alors le seuil de capacité d'adaptation aura été dépassé. De même, il ne faut pas non plus laisser son corps trop longtemps au repos car si aucun stress ne lui est appliqué alors aucune adaptation ne se fera. Le risque de blessure sera tout aussi important car le moindre stress appliqué ne sera pas supporté et le risque de récurrence sera tout autant élevé. Il faudra trouver ainsi le juste milieu dans les entraînements du patient afin d'augmenter le seuil d'adaptation aux différentes contraintes et permettre de progresser sans risquer de se blesser à nouveau.

La prise en compte de tous ces facteurs permettra au kinésithérapeute de considérer le patient dans sa globalité. Ainsi, l'analyse de facteurs de risques biomécaniques, un programme de renforcement musculaire et une éducation thérapeutique basée sur la quantification du stress mécanique peuvent être des pistes de recherche de traitements préventifs ou curatifs au coureur.

Pour finir, il est nécessaire de préciser que le but de cette revue n'est pas de mettre en avant une biomécanique de course parfaite et universelle car cette dernière n'existe pas. Un coureur avec une biomécanique altérée mais ne dépassant pas son seuil d'adaptation au stress mécanique ne sera pas forcément à risque de blessures.

## 5.4 Qualités de preuves

Démontrer la qualité de preuve d'une revue de littérature est essentiel afin d'estimer sa portée dans le domaine de la santé. Elle dépend de plusieurs facteurs comme la qualité de méthodologie de recherche, le processus de sélection des études, le niveau de preuve des études incluses dont leurs méthodologies et leurs résultats, la synthèse de ces derniers et leurs interprétations ainsi que la classification des recommandations. [54]

Selon la HAS, le **système GRADE** est un système qui reprend un de ces critères d'évaluation et qui permet une gradation de recommandations selon 3 grades A, B ou C :

Grade des recommandations	Niveau de preuve scientifique fourni par la littérature
A Preuve scientifique établie	Niveau 1 - essais comparatifs randomisés de forte puissance ; - méta-analyse d'essais comparatifs randomisés ; - analyse de décision fondée sur des études bien menées.
B Présomption scientifique	Niveau 2 - essais comparatifs randomisés de faible puissance ; - études comparatives non randomisées bien menées ; - études de cohortes.
C Faible niveau de preuve scientifique	Niveau 3 - études cas-témoins.
	Niveau 4 - études comparatives comportant des biais importants ; - études rétrospectives ; - séries de cas ; - études épidémiologiques descriptives (transversale, longitudinale).

Figure 14. Grade des recommandations selon la HAS [54]

Malgré la présence d'une étude cas-témoin incluse avec un niveau 3 de preuve scientifique dans notre revue, les sept autres études incluses sont des études de cohortes représentant un niveau 2 de preuve scientifique. Nous pouvons accorder un **grade B** des recommandations pour les sept études de cohortes et un **grade C** pour l'étude cas-témoins.

En plus de ces recommandations, il faut donc prendre en compte le **niveau de preuve** de chaque étude incluse en jugeant sa capacité à répondre à la question clinique posée. Il dépend donc de la présence de biais lors de l'étude, de ses résultats statistiques adaptés aux critères de jugement ainsi que la puissance de l'étude c'est-à-dire la taille de l'échantillon.[54] Ce niveau de preuve pour chaque étude a été évalué à l'aide de l'échelle NOS dans la partie « Résultats » de notre revue.

La HAS décrit trois niveaux de preuve : faible/intermédiaire/fort.

Les études incluses répondent toutes à un niveau de preuve intermédiaire car malgré leur note à l'échelle NOS il existe de nombreux biais décrits précédemment et les petites tailles d'échantillon qui peuvent impacter le niveau de preuve de chacune.

	Schéma d'étude	Score à la NOS	Grade des recommandations	Niveau de preuve
<b>Nielsen et al.2014</b>	Etude de cohorte	8/9	B2	Intermédiaire
<b>Ramskov et al.2013</b>	Etude de cohorte	8/9	B2	Intermédiaire
<b>Dudley et al.2017</b>	Etude de cohorte	6/9	B2	Intermédiaire

<b>Messier et al.2018</b>	Etude de cohorte	6/9	B2	Intermédiaire
<b>Jungmalm et al.2020</b>	Etude de cohorte	7/9	B2	Intermédiaire
<b>Kuhman et al.2016</b>	Etude de cohorte	6/9	B2	Intermédiaire
<b>Becker et al.2018</b>	Etude de cohorte	6/9	B2	Intermédiaire
<b>Perez-Morcillo et al.2018</b>	Cas-témoin	8/9	C3	Intermédiaire

Tableau XV. Niveaux de preuve des études incluses

Tableau VI. Qualités de preuve

## 5.5 Limites et biais potentiels de la revue

Les biais potentiels de la revue ont été évalués à l'aide des seize items de la traduction française de l'échelle AMSTAR-2 (Annexe 5) qui est une grille d'évaluation de la qualité méthodologique des revues de littérature. Elle permet d'évaluer la validité interne de la revue.[88]

	Questions	Réponse	Justifications
<b>1</b>	Est-ce que la question de recherche et les critères d'inclusion de la revue ont inclus les critères PICO ?	Oui	Les critères d'inclusion et la question de recherche sont disponibles dans la partie « <i>Méthodologie</i> ».
<b>2</b>	Est-ce que le rapport de la revue contenait une déclaration explicite indiquant que la méthode de la revue a été établie avant de conduire la revue ? Est-ce que le rapport justifiait toute déviation significative par rapport au protocole ?	Non	Aucune déclaration explicite n'a été donné en amont de la réalisation de la revue.
<b>3</b>	Les auteurs ont-ils expliqué leur choix de schémas d'études à inclure dans la revue ?	Oui	Le choix des schémas d'études a été expliqué dans la partie « <i>Méthodologie</i> ».
<b>4</b>	Les auteurs ont-ils utilisé une stratégie de recherche documentaire exhaustive ?	Oui	Plusieurs bases de données scientifiques ont été utilisé comme Pubmed, CochranLibrary, ScienceDirect ou encore Google Scholar.
<b>5</b>	Les auteurs ont-ils effectué en double la sélection des études ?	Non	Non-réalisable
<b>6</b>	Les auteurs ont-ils effectué en double l'extraction des données ?	Non	Non-réalisable
<b>7</b>	Les auteurs ont-ils fourni une liste des études exclues et justifié les exclusions ?	Oui	Les tableaux des études exclues sont disponibles dans la partie « <i>Résultats</i> ».
<b>8</b>	Les auteurs ont-ils décrit les études incluses de manière suffisamment détaillée ?	Oui	Les caractéristiques détaillées des études incluses sont disponibles en Annexe 1.

<b>9</b>	Les auteurs ont-ils utilisé une technique satisfaisante pour évaluer le risque de biais des études individuelles incluses dans la revue ?	Oui	La NOS pour évaluer le risque de biais des études de cohortes et cas-témoins a été utilisée.
<b>10</b>	Les auteurs ont-ils indiqué les sources de financements des études incluses dans la revue ?	Oui	La description des sources de financements des études se trouve dans la partie « Résultats ».
<b>11</b>	Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs ont-ils utilisé des méthodes appropriées pour la combinaison statistique des résultats ?	Oui	La combinaison statistique des résultats a été réalisée à l'aide du logiciel ReviewManager.
<b>12</b>	Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs ont-ils évalué l'impact potentiel des risques de biais des études individuelles sur les résultats de la méta-analyse ou d'une autre synthèse de preuves ?	Oui	Oui, les risques de biais individuels ont été pris en compte.
<b>13</b>	Les auteurs ont-ils pris en compte le risque de biais des études individuelles lors de l'interprétation/discussion des résultats de la revue ?	Oui	Oui, les risques de biais individuels ont été pris en compte.
<b>14</b>	Les auteurs ont-ils fourni une explication satisfaisante pour toute hétérogénéité observée dans les résultats de la revue, et une discussion sur celle-ci ?	Oui	Une forte hétérogénéité a été établie. L'explication et la discussion de celle-ci se trouvent dans la partie Discussion.
<b>15</b>	S'ils ont réalisé une synthèse quantitative, les auteurs ont-ils mené une évaluation adéquate des biais de publications (biais de petite étude) et ont discuté de son impact probable sur les résultats de la revue ?	Non	Il n'y a pas eu de funnels-plots réalisés à partir des résultats de chaque forest-plots.
<b>16</b>	Les auteurs ont-ils rapporté toute source potentielle de conflit d'intérêts, y compris tout financement reçu pour réaliser la revue ?	Oui	Cette revue ne possède aucune source potentielle de conflits d'intérêts et n'a reçu aucun financement.

Tableau XVI. Grille d'évaluation AMSTAR-2[88]

La sélection des études et l'extraction des données n'a pas pu se faire par deux auteurs car il s'agit d'un travail de recherche individuel. Il est donc important de noter que les réponses à ces items ont pu être influencées par la subjectivité de l'auteur.

D'autres limites ont pu être le fait que peu d'études aient été incluses dans la revue, seulement huit études ont été incluses dont trois études qui évaluent la pronation du pied de façon statique et cinq études de façon dynamique ce qui limitent le nombre d'études qui peuvent se comparer entre elles ainsi les résultats sont à prendre avec précaution.

Au niveau des schéma d'études, le fait d'avoir incorporer une étude de type cas-témoins a pu constituer également un risque de biais et limite la comparaison avec les autres études. En fait, les études cas-témoins possède un niveau de preuve plus faible et concerne des coureurs participants déjà blessés.



## 6 CONCLUSION

### Implication pour la pratique clinique

Le nombre grandissant de « néo-runners » et de la pratique de la course à pied dans la population nous a conduit à se questionner en ce qui concerne les mécanismes de blessures liées à cette pratique. Le but de cette revue de littérature était de mettre en évidence un lien entre la posture et les caractéristiques du mouvement de pronation et l'apparition de blessures chez le coureur à pied. La synthèse qualitative et quantitative des différentes études étiologiques analysées ne nous a pas permis de démontrer unanimement le rôle de la pronation du pied comme facteur de risque. Néanmoins, certains résultats nous encouragent à poursuivre d'autres recherches quant à la place des mouvements cinématiques du pied dans le risque de blessures. De plus, en sachant que l'apparition de blessures dépend de nombreux facteurs et peut s'installer progressivement, des études concernant l'impact d'autres facteurs de risques intrinsèques ou extrinsèques au coureur semblent nécessaires. Ainsi dans un contexte holistique, la mise en place d'un traitement préventif ou curatif concernant la biomécanique de la course chez certains patients nous paraît justifiée sans pour autant que cette rééducation ne soit basée que sur ce facteur.

Dans la pratique de leur profession, les kinésithérapeutes sont souvent amenés à prendre en charge des patients sportifs amateurs ou plus aguerris en course à pied. Ainsi la mise en place d'outils de mesure d'analyse de mouvements qui seraient simples d'utilisation et peu coûteux pourrait être utile dans la pratique libérale. Ils permettraient de mettre en évidence et de quantifier les défauts ou le dysfonctionnement de la biomécanique de leur course et de pouvoir les accompagner dans la correction de celle-ci. Les études concernant des programmes de renforcement musculaire des muscles extrinsèques et intrinsèques du pied pourraient être une piste dans la prévention ou le traitement des blessures liées à la course. De plus, dans la prise en charge de patients sportifs, le point primordial sera d'accompagner et de conseiller le coureur dans la quantification de sa charge d'entraînement. Il sera conseillé dans la progressivité de sa pratique pour augmenter petit à petit son seuil d'adaptation aux contraintes et diminuer son exposition aux risques de blessures.

### Implication pour la recherche

Les hétérogénéités élevées concernant la méthodologie de nos études ont été un frein dans leur comparaison ainsi que dans l'analyse de nos facteurs de risque. En effet, notre question de recherche a englobé une large population de coureurs et s'est intéressée à de nombreuses blessures liées à la course à pied. Des études ciblant une population précise de coureurs seraient plus pertinentes afin de pouvoir comparer les résultats car les contraintes imposées sur le corps ne sont pas les mêmes selon les niveaux de pratique. De plus, les études devraient porter leur attention sur une blessure spécifique liée à la course afin de pouvoir analyser plus précisément un lien de causalité entre le facteur de risque et la physiopathologie de la blessure.

Ainsi, concernant les futures recherches, des études de cohortes prospectives similaires sur une longue période de suivi devraient être réalisées. Des études prenant en compte plusieurs facteurs de risques intrinsèques comme des facteurs psychologiques, physiologiques, biomécaniques ainsi que des facteurs extrinsèques comme la charge d'entraînements et l'environnement seraient donc plus pertinentes afin de considérer le coureur dans son entière globalité.

## 7 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Lacouture P, Colloud F, Decatoire A, Monnet T. Étude Biomécanique De La Course. Encycl Médico-Chirurgicale, Trait Podol 2013;9:1–20.
- [2] Observatoire du Running 2021 : l'étude de référence n.d. <https://blog.sportheroes.com/fr/observatoire-du-running-2021> (accessed April 22, 2023).
- [3] Hulteen RM, Smith JJ, Morgan PJ, Barnett LM, Hallal PC, Colyvas K, et al. Global participation in sport and leisure-time physical activities: A systematic review and meta-analysis. *Prev Med (Baltim)* 2017;95:14–25. <https://doi.org/10.1016/j.YPMED.2016.11.027>.
- [4] Lee DC, Pate RR, Lavie CJ, Sui X, Church TS, Blair SN. Leisure-time running reduces all-cause and cardiovascular mortality risk. *J Am Coll Cardiol* 2014;64:472–81. <https://doi.org/10.1016/j.JACC.2014.04.058>.
- [5] Oswald F, Campbell J, Williamson C, Richards J, Kelly P. A scoping review of the relationship between running and mental health. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17:1–39. <https://doi.org/10.3390/ijerph17218059>.
- [6] (PDF) Biomécanique de la course à pied n.d.
- [7] Dugan SA, Bhat KP. Biomechanics and analysis of running gait. *Phys Med Rehabil Clin N Am* 2005;16:603–21. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2005.02.007>.
- [8] Tourné Y, Mabit C. La cheville instable. De l'entorse récente à l'instabilité chronique. 2015:384.
- [9] Hintermann B, Nigg BM. Pronation in runners Im...njuries.pdf. *Sport Med* 1998;26:169–76.
- [10] Maestro M, Ferre B. Anatomie fonctionnelle du pied et de la cheville de l'adulte. *Rev Du Rhum Monogr* 2014;81:61–70. <https://doi.org/10.1016/j.monrhu.2014.03.001>.
- [11] Watkins J. Structure and Function of the Foot. *Neale's Disord Foot Ankle* 2020:1–11. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7020-6223-0.00001-7>.
- [12] R. S, R. S, M. H. DEUX MARCHES POUR LA MACHINE HUMAINE. La Louvière: Kiné-Sciences; 1989.
- [13] Delafontaine A. Locomotion humaine : bases fondamentales, évaluation clinique et applications thérapeutiques de l'enfant à l'adulte n.d.
- [14] Gindre C, Lussiana T, Hebert-Losier K, Mourot L. Aerial and Terrestrial Patterns: A Novel Approach to Analyzing Human Running. *Int J Sports Med* 2016;37:25–9. <https://doi.org/10.1055/S-0035-1555931>.
- [15] Stacoff A, Kaelin X, Stuessi E, Segesser B. The Torsion of the Foot in Running 1989:375–89.
- [16] Lieberman DE, Venkadesan M, Werbel WA, Daoud AI, Dandrea S, Davis IS, et al. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature* 2010;463:531–5. <https://doi.org/10.1038/nature08723>.
- [17] Babu D, Bordoni B. Anatomy, Bony Pelvis and Lower Limb, Medial Longitudinal Arch of the Foot. *StatPearls* 2022.
- [18] Bartoníček J, Rammelt S, Naňka O. Anatomy of the Subtalar Joint. *Foot Ankle Clin* 2018;23:315–40. <https://doi.org/10.1016/j.fcl.2018.04.001>.
- [19] Maceira E, Monteagudo M. Subtalar Anatomy and Mechanics. *Foot Ankle Clin* 2015;20:195–221. <https://doi.org/10.1016/j.fcl.2015.02.001>.
- [20] Ghanem I, Massaad A, Assi A, Rizkallah M, Bizdikian AJ, El Abiad R, et al. Understanding the foot's functional anatomy in physiological and pathological conditions: the calcaneopedal unit concept. *J Child Orthop* 2019;13:134. <https://doi.org/10.1302/1863-2548.13.180022>.
- [21] Epeldegui T, Delgado E. Acetabulum pedis. Part II: Talocalcaneonavicular joint socket in clubfoot. *J Pediatr Orthop Part B* 1995;4:11–6. <https://doi.org/10.1097/01202412-199504010-00002>.
- [22] Seringe R, Wicart P. Les articulations talo-naviculaire et sous-taliennes: Le concept de « bloc calcanéo-pédieux ». *Rev Chir Orthop Traumatol* 2013;99:248–59. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2013.07.002>.

- [23] Jastifer JR, Gustafson PA. The subtalar joint: Biomechanics and functional representations in the literature. *Foot* 2014;24:203–9. <https://doi.org/10.1016/j.foot.2014.06.003>.
- [24] Maestro M, Ferre B. Anatomie fonctionnelle du pied et de la cheville de l'adulte. *Rev Du Rhum Monogr* 2014;81:61–70. <https://doi.org/10.1016/J.MONRHU.2014.03.001>.
- [25] Maestro M. Rappel biomécanique des articulations talo-crurale et sous-talienne. *Médecine Chir Du Pied* 2004;20:6–10. <https://doi.org/10.1007/s10243-040-0005>.
- [26] Close1967-the function of the subtalar joint.pdf n.d.
- [27] Horwood AM, Chockalingam N. Defining excessive, over, or hyper-pronation: A quandary. *Foot* 2017;31:49–55. <https://doi.org/10.1016/j.foot.2017.03.001>.
- [28] Snook AG. The Relationship between Excessive Pronation as Measured by Navicular Drop and Isokinetic Strength of the Ankle Musculature 2001:234–40.
- [29] Arain A, Harrington MC, Rosenbaum AJ. Adult Acquired Flatfoot. *StatPearls* 2022.
- [30] Tiberio D. The Effect of Excessive Subtalar Joint Pronation on Patellofemoral Mechanics : A Theoretical Model 1987:160–5.
- [31] Khamis S, Yizhar Z. Effect of feet hyperpronation on pelvic alignment in a standing position. *Gait Posture* 2007;25:127–34. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.02.005>.
- [32] Pinskiy GB. THE MECHANICS OF THE FOOT II. THE PLANTAR APONEUROSIS AND THE ARCH. *Elektrotekhnik* 2003:34–40.
- [33] Sichtung F, Ebrecht F. The rise of the longitudinal arch when sitting, standing, and walking: Contributions of the windlass mechanism. *PLoS One* 2021;16:1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249965>.
- [34] Hintermann B, Ruiz R. Biomechanics of Medial Ankle and Peritalar Instability. *Foot Ankle Clin* 2021;26:249–67. <https://doi.org/10.1016/j.fcl.2021.03.002>.
- [35] Rule J, Yao L, Seeger LL. Spring ligament of the ankle: normal MR anatomy. *AJR Am J Roentgenol* 1993;161:1241–4. <https://doi.org/10.2214/AJR.161.6.8249733>.
- [36] McKeon PO, Fourchet F. Freeing the foot. Integrating the foot core system into rehabilitation for lower extremity injuries. *Clin Sports Med* 2015;34:347–61. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2014.12.002>.
- [37] Tourillon R, Gojanovic B, Fourchet F. How to Evaluate and Improve Foot Strength in Athletes: An Update. *Front Sport Act Living* 2019;1:1–12. <https://doi.org/10.3389/fspor.2019.00046>.
- [38] Fourchet F, Gojanovic B. Foot core strengthening: Relevance in injury prevention and rehabilitation for runners. *Schweizerische Zeitschrift Fur Sport Und Sport* 2016;64:26–30. <https://doi.org/10.34045/ssem/2016/3>.
- [39] Fields KB, Sykes JC, Walker KM, Jackson JC. Prevention of Running Injuries. *Curr Sports Med Rep* 2010;9:176–82.
- [40] Parma Yamato T, Tirrotti Saragiotto BP, Dias Lopes A. Downloaded from www.jospt.org at Seton Hall University on 2015.
- [41] Van Gent RN, Siem D, Van Middelkoop M, Van Os AG, Bierma-Zeinstra SMA, Koes BW. Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: A systematic review. *Br J Sports Med* 2007;41:469–80. <https://doi.org/10.1136/bjism.2006.033548>.
- [42] Willwacher S, Kurz M, Robbin J, Thelen M, Hamill J, Kelly L, et al. Running-Related Biomechanical Risk Factors for Overuse Injuries in Distance Runners: A Systematic Review Considering Injury Specificity and the Potentials for Future Research. *Sport Med* 2022;52:1863–77. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01666-3>.
- [43] Van Der Worp MP, Ten Haaf DSM, Van Cingel R, De Wijer A, Nijhuis-Van Der Sanden MWG, Bart Staal J. Injuries in runners; a systematic review on risk factors and sex differences. *PLoS One* 2015;10:1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114937>.
- [44] Lopes AD, Hespanhol LC, Yeung SS, Costa LOP. What are the Main Running-Related Musculoskeletal Injuries? *Sport Med* 2012;42:891–905. <https://doi.org/10.1007/bf03262301>.
- [45] Sharma P, Maffulli N. Biology of tendon injury : healing , modeling and remodeling 2006;6:181–90.

- [46] Yin L, Kwan A, Killingback A, Addis PJ. Ultrasound Measurement of Lateral Patellar Displacement : A Cadaveric Validation Study 2022;17:1113–8.
- [47] Burton M, Mines B. Management of Patellofemoral Pain Syndrome n.d.
- [48] Aderem J, Louw QA. Biomechanical risk factors associated with iliotibial band syndrome in runners : a systematic review. *BMC Musculoskelet Disord* 2015;7–9. <https://doi.org/10.1186/s12891-015-0808-7>.
- [49] Men C, Prieto A, Miguel Á. Medial Tibial Stress Syndrome in Novice and Recreational Runners : A Systematic Review 2020.
- [50] Assessment O. Medial Tibial Stress Syndrome Diagnosis , Treatment and Outcome Assessment. n.d.
- [51] Milner CE, Foch E, Gonzales JM, Petersen D. Department of Physical Therapy and Rehabilitation Sciences , Drexel University ,. *J Sport Heal Sci* 2022;0–33. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2022.12.002>.
- [52] Gmachowska AM, Żabicka M, Pachó R, Pachó S, Majek A, Feldman B. Tibial stress injuries – location , severity , and classification in magnetic resonance imaging examination 2018;471–81.
- [53] Becker BA, Childress MA. Common foot problems: Over-the-counter treatments and home care. *Am Fam Physician* 2018;98:298–303.
- [54] HAS. Niveau de preuve et gradation des recommandations de bonne pratique. *Etat Des Lieux* 2013:192.
- [55] Pallot A, Rostagno S. Newcastle-Ottawa Scale: French translation of the methodological quality scale for cohort studies. *Kinesitherapie* 2021;21:3–4. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2019.12.046>.
- [56] Hetsroni I, Finestone A, Milgrom C, Ben-Sira D, Nyska M, Mann G, et al. The role of foot pronation in the development of femoral and tibial stress fractures: A prospective biomechanical study. *Clin J Sport Med* 2008;18:18–23. <https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e31815ed6bf>.
- [57] Scattone Silva R, Smitheman HP, Smith AK, Silbernagel KG. Are static foot posture and ankle dorsiflexion range of motion associated with Achilles tendinopathy? A cross-sectional study. *Brazilian J Phys Ther* 2022;26. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2022.100466>.
- [58] Franklyn-Miller A, Bilzon J, Wilson C, McCrory P. Can RSScan footscan® D3D™ software predict injury in a military population following plantar pressure assessment? A prospective cohort study. *Foot* 2014;24:6–10. <https://doi.org/10.1016/j.foot.2013.11.002>.
- [59] Bredeweg SW, Kluitenberg B, Bessem B, Buist I. Differences in kinetic variables between injured and noninjured novice runners: A prospective cohort study. *J Sci Med Sport* 2013;16:205–10. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2012.08.002>.
- [60] Chang R, Rodrigues PA, Van Emmerik REA, Hamill J. Multi-segment foot kinematics and ground reaction forces during gait of individuals with plantar fasciitis. *J Biomech* 2014;47:2571–7. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.06.003>.
- [61] Malisoux L, Chambon N, Delattre N, Gueguen N, Urhausen A, Theisen D. Injury risk in runners using standard or motion control shoes: A randomised controlled trial with participant and assessor blinding. *Br J Sports Med* 2016;50:481–7. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095031>.
- [62] Becker J, James S, Osternig L, Chou LS. Foot Kinematics Differ Between Runners With and Without a History of Navicular Stress Fractures. *Orthop J Sport Med* 2018;6:1–9. <https://doi.org/10.1177/2325967118767363>.
- [63] Bramah C, Preece SJ, Gill N, Herrington L. Is There a Pathological Gait Associated With Common Soft Tissue Running Injuries? *Am J Sports Med* 2018;46:3023–31. <https://doi.org/10.1177/0363546518793657>.
- [64] Koldenhoven RM, Virostek A, DeJong AF, Higgins M, Hertel J. Increased contact time and strength deficits in runners with exercise-related lower leg pain. *J Athl Train* 2020;55:1247–54. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-0514.19>.

- [65] Brund RBK, Rasmussen S, Nielsen RO, Kersting UG, Laessoe U, Voigt M. Medial shoe-ground pressure and specific running injuries: A 1-year prospective cohort study. *J Sci Med Sport* 2017;20:830–4. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.04.001>.
- [66] Noehren B, Hamill J, Davis I. Prospective evidence for a hip etiology in patellofemoral pain. *Med Sci Sports Exerc* 2013;45:1120–4. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31828249d2>.
- [67] Zifchock R, Parker R, Wan W, Neary M, Song J, Hillstrom H. The relationship between foot arch flexibility and medial-lateral ground reaction force distribution. *Gait Posture* 2019;69:46–9. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.01.012>.
- [68] Koblbauer IF, van Schooten KS, Verhagen EA, van Dieën JH. Kinematic changes during running-induced fatigue and relations with core endurance in novice runners. *J Sci Med Sport* 2014;17:419–24. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.05.013>.
- [69] Lachniet PB, Taylor-Haas JA, Paterno M V., DiCesare CA, Ford KR. Altered Sagittal Plane Hip Biomechanics in Adolescent Male Distance Runners With a History of Lower Extremity Injury. *Int J Sports Phys Ther* 2018;13:441–52. <https://doi.org/10.26603/ijsp20180441>.
- [70] Nielsen RO, Buist I, Parner ET, Nohr EA, Sørensen H, Lind M, et al. Foot pronation is not associated with increased injury risk in novice runners wearing a neutral shoe: A 1-year prospective cohort study. *Br J Sports Med* 2014;48:440–7. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092202>.
- [71] Ramskov D, Ba ML, Mhsc K, Mhsc RO. NO ASSOCIATION BETWEEN Q ANGLE AND FOOT POSTURE WITH RUNNING RELATED INJURIES : A 10 WEEK PROSPECTIVE FOLLOW UP STUDY 2013;8:407–15.
- [72] Pérez-Morcillo A, Gómez-Bernal A, Gil-Guillen VF, Alfaro-Santafé J, Alfaro-Santafé JV, Quesada JA, et al. Association between the Foot Posture Index and running related injuries: A case-control study. *Clin Biomech* 2019;61:217–21. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2018.12.019>.
- [73] Messier SP, Martin DF, Mihalko SL, Ip E, DeVita P, Cannon DW, et al. A 2-Year Prospective Cohort Study of Overuse Running Injuries: The Runners and Injury Longitudinal Study (TRAILS). *Am J Sports Med* 2018;46:2211–21. <https://doi.org/10.1177/0363546518773755>.
- [74] Jungmalm J, Nielsen RØ, Desai P, Karlsson J, Hein T, Grau S. Associations between biomechanical and clinical/anthropometrical factors and running-related injuries among recreational runners: A 52-week prospective cohort study. *Inj Epidemiol* 2020;7:1–9. <https://doi.org/10.1186/s40621-020-00237-2>.
- [75] Kuhman DJ, Paquette MR, Peel SA, Melcher DA. Comparison of ankle kinematics and ground reaction forces between prospectively injured and uninjured collegiate cross country runners. *Hum Mov Sci* 2016;47:9–15. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.01.013>.
- [76] Dudley RI, Pamukoff DN, Lynn SK, Kersey RD, Noffal GJ. A prospective comparison of lower extremity kinematics and kinetics between injured and non-injured collegiate cross country runners. *Hum Mov Sci* 2017;52:197–202. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2017.02.007>.
- [77] Becker J, Nakajima M, Wu WFW. Factors Contributing to Medial Tibial Stress Syndrome in Runners: A Prospective Study. vol. 50. 2018. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001674>.
- [78] Sheet R. The Foot Posture Index. *J Am Podiatr Med Assoc* 2014;103:400–4. <https://doi.org/10.7547/1030400>.
- [79] Schurr SA, Ed M, Marshall AN, Ed M, Resch JE, Saliba SA, et al. 2D vs 3D motion capture. *Int J Sports Phys Ther* 2017;12:163–72.
- [80] Leardini A, Stebbins J, Hillstrom H, Caravaggi P, Deschamps K, Arndt A. ISB recommendations for skin-marker-based multi-segment foot kinematics. *J Biomech* 2021;125:110581. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110581>.
- [81] Chuter VH. Relationships between foot type and dynamic rearfoot frontal plane motion. *J Foot Ankle Res* 2010;3:1–6. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-3-9>.
- [82] Paterson KL, Clark RA, Mullins A, Bryant AL, Mentiplay BF. Predicting dynamic foot function from static foot posture: Comparison between visual assessment, motion analysis, and a

- commercially available depth camera. *J Orthop Sports Phys Ther* 2015;45:789–98.  
<https://doi.org/10.2519/jospt.2015.5616>.
- [83] Kakouris N, Yener N, Fong DTP. A systematic review of running-related musculoskeletal injuries in runners. *J Sport Heal Sci* 2021;10:513–22.  
<https://doi.org/10.1016/j.jshs.2021.04.001>.
- [84] Fortune AE, Sims JMG, Rhodes SJ, Ampat G. Does orthotics use improve comfort, speed and injury rate during running? Preliminary analysis of a randomised control trial. *World J Orthop* 2022;13:652–61. <https://doi.org/10.5312/wjo.v13.i7.652>.
- [85] Taddei UT, Matias AB, Duarte M, Sacco ICN. Foot Core Training to Prevent Running-Related Injuries: A Survival Analysis of a Single-Blind, Randomized Controlled Trial. *Am J Sports Med* 2020;48:3610–9.
- [86] Matias AB, Taddei UT, Duarte M, Sacco ICN. Protocol for evaluating the effects of a therapeutic foot exercise program on injury incidence, foot functionality and biomechanics in long-distance runners: A randomized controlled trial. *BMC Musculoskelet Disord* 2016;17:1–11. <https://doi.org/10.1186/s12891-016-1016-9>.
- [87] Barton CJ. Managing RISK when treating the injured runner with running retraining, load management and exercise therapy. *Phys Ther Sport* 2018;29:79–83.  
<https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2017.10.002>.
- [88] Pallot A, Rostagno S. AMSTAR-2: French translation of the methodological quality scale for systematic literature review. *Kinesitherapie* 2021;21:13–4.  
<https://doi.org/10.1016/j.kine.2019.12.050>.

## Sommaire des figures

Figure 1 Schématisation de la phase d'appui - Livre "La cheville instable"[8] .....	3
Figure 2 Différents types de foulées : a. Pronatrice b. Neutre c. Supinatrice [1].....	6
Figure 3 Pattern Aérien et Pattern Terrien[14] .....	6
Figure 4 Unité talo-tibio-fibulaire (UTTF) et le bloc calcanéopédieux (BCP) [22] .....	9
Figure 5. Mouvements d'éversion et d'inversion du pied [10] .....	10
Figure 6 Effet de la pronation sur l'alignement des membres inférieurs [31] .....	12
Figure 7. Windlass mechanism ou "effet treuil" lors de l'appui [33] .....	13
Figure 8 Grade NHMRC [54] .....	19
Figure 9. Diagramme de flux .....	25
Figure 10. Nielsen et al.[70] .....	45
Figure 11. Forest plot concernant le pic maximal d'éversion .....	48
Figure 12 Forest plot concernant la vitesse d'éversion.....	50
Figure 13 Forest plot concernant l'amplitude totale d'éversion.....	52
Figure 14. Grade des recommandations selon la HAS [54] .....	56

## Sommaire des tableaux

Tableau I. Etudes exclues après lecture du résumé .....	26
Tableau II. Etudes exclues après lecture intégrale.....	26
Tableau III. Articles inclus.....	27
Tableau IV. Caractéristiques des études incluses.....	30
Tableau V. Biais évalués par la Newcastle Ottawa Scale .....	31
Tableau VI. Synthèse des biais retrouvés.....	36
Tableau VII. Résultats de l'étude de Nielsen et al. ....	37
Tableau VIII. Résultats de Ramskov et al.....	38
Tableau IX. Résultats de l'étude de Perez-Morcillo et al.....	38
Tableau X. Résultats de l'étude de Messier et al. ....	39
Tableau XI. Résultats de l'étude de Jungmalm et al.....	39
Tableau XII. Résultats de l'étude de Kuhman et al.....	40
Tableau XIII. Résultats de l'étude de Becker et al. ....	40
Tableau XIV. Résultats de l'étude de Dudley et al.....	40
Tableau XV. Niveaux de preuve des études incluses .....	57
Tableau XVI. Grille d'évaluation AMSTAR-2[88].....	58

## 8 ANNEXES

### Annexe 1 : Caractéristiques des études incluses

Titre : Foot pronation is not associated with increased injury risk in novices runners wearing a neutral shoe : a 1-year prospective cohort study	
<b>Auteur et date</b>	Nielsen <i>et al.</i> 2014
<b>Schéma d'étude et temps de suivi</b>	Etude de cohorte prospective Temps de suivi : 1 an
<b>Population</b>	927 coureurs novices (466 hommes et 461 femmes) : fortement supiné (n = 53), supiné (n = 369), neutre (n = 1292), pronation (n=122) ou fortement pronée (n=18). Age moyen : 37,1 ans (IC 95% [36,5 ; 37,8]) IMC moyen : 26,3 (IC 95% [26,0 ; 26,6])
<b>Critères d'inclusion et exclusion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Inclusion : avoir entre 18 et 65 ans, ne pas être blessés au moment et 3 mois avant le début de l'étude, avoir accès à Internet et une adresse-mail et ne pas courir régulièrement (&lt;10km dans les 12 derniers mois)</li> <li>➤ Exclusion : participation à d'autres sports (plus de 4h/semaine), utilisation de semelles, être enceinte, avoir des antécédents de maladies cardiaques ou d'AVC, refuser de porter des chaussures neutres ou d'utiliser une montre GPS.</li> </ul>
<b>Définition de la blessure en course à pied</b>	« Plainte musculosquelettique du dos ou des membres inférieurs causée par la course à pied, qui a limité la pratique pendant au moins une semaine ».
<b>Objectifs</b>	Etudier si la distance de course parcourue jusqu'à la première blessure varie en fonction de la posture du pied chez des coureurs novices portant des chaussures neutres.
<b>Facteurs de risque étudiés</b>	Posture du pied statique
<b>Méthode d'évaluation</b>	Foot posture index (FPI)  Les participants devaient ensuite commencer à courir dans une chaussure de course neutre et utiliser une montre du système de positionnement global pour quantifier la distance de course à chaque séance d'entraînement.



<b>Titre : No association between Q-angle and foot posture with running related injuries : a 10-week prospective follow-up study</b>	
<b>Auteur et date</b>	Ramskov <i>et al.</i> 2013
<b>Schéma d'étude</b>	Etude de cohorte prospective Temps de suivi : 10 semaines
<b>Population</b>	60 coureurs novices danois (32 hommes et 28 femmes) <b>Au total</b> : pieds en forte supination = 0, pieds en supination = 4, pieds neutres = 93, pieds en pronation = 17, pieds fortement en pronation = 4 Âge médian : 39,8 ans $\pm$ 9,3 ans IMC 25,5 $\pm$ 3,9
<b>Critères d'inclusion et exclusion</b>	Inclusion : être en bonne santé, avoir entre 18 et 65 ans, ne pas avoir subi de blessures dans les 3 mois précédent l'étude, ne pas avoir couru plus de 10 kilomètres dans les 12 derniers mois.
<b>Définition de la blessure en course à pied</b>	« Plainte musculosquelettique du dos ou des membres inférieurs causée par la course à pied, qui a limité la pratique pendant au moins une semaine ».
<b>Objectifs</b>	Etudier si la distance de course parcourue jusqu'à la blessure liée à la course diffère chez les coureurs novices ayant une posture du pied et un angle Q différents lorsqu'ils courent avec des chaussures neutres.
<b>Facteurs de risque étudiés</b>	Posture statique du pied
<b>Méthode d'évaluation</b>	Mesure de la posture du pied à l'aide du Foot posture Index (FPI) puis les participants ont reçu une paire de chaussures neutres et une montre GPS permettant de quantifier leur charge d'entraînement. Ils étaient tout de même invités à télécharger leurs entraînements, au minimum toutes les deux semaines, sur un site internet développé par l'étude. Ils pouvaient ensuite courir comme ils le souhaitaient sans restriction au minimum deux fois par semaine pendant les dix semaines de suivi.

<b>Titre : Association between the Foot Posture Index and running-related injuries : a case control study</b>	
<b>Auteur et date</b>	Perez-Morcillo <i>et al.</i> 2018
<b>Schéma d'étude</b>	Etude cas-témoins
<b>Population</b>	<p>600 coureurs novices (429 femmes et 171 hommes)  300 coureurs sains dans le groupe témoin et 300 coureurs blessés dans le groupe cas</p> <p><b>Dans le groupe cas :</b> pieds en forte supination = 26, pieds en supination = 42, pieds neutres = 64, pieds en pronation = 110, pieds en forte en pronation = 58</p> <p><b>Dans le groupe témoin :</b> pieds en forte supination = 1, pieds en supination = 28, pieds neutres = 191, pieds en pronation = 71, pieds en forte pronation = 9</p> <p>Âge moyen : 38,6 ans ± 6,8  IMC moyen : 22,6 (±1,5) pour les cas  22,3 (±1,5) pour les témoins</p>
<b>Critères d'inclusion et exclusion</b>	<p>Inclusion : avoir entre 30 et 50 ans, être un coureur novice, avoir un IMC inférieur à 28, courir 2 à 3 fois par semaine durant l'étude, utiliser des chaussures de courses neutres.</p> <p>Exclusion : avoir un statut d'athlète professionnel dans n'importe quel sport, avoir subi une chirurgie ou des blessures des membres inférieurs (&lt; 1 an) et utiliser des semelles.</p>
<b>Définition de la blessure en course à pied</b>	« Douleurs musculosquelettiques liées à la course dans les membres inférieurs ou dans le dos qui entraînent une restriction ou un arrêt de la course (distance, vitesse, durée ou entraînement) de plus de sept jours ou de trois entraînements programmés consécutifs, ou qui obligent le coureur à consulter un médecin ou un autre professionnel de la santé. »
<b>Objectifs</b>	Etudier la relation entre les blessures liées à la course à pied, la posture du pied et d'autres facteurs de risques chez les coureurs novices.
<b>Facteurs de risque étudiés</b>	Posture statique du pied
<b>Méthode d'évaluation</b>	Foot posture Index (FPI) selon le score : -12 à -5 : fortement en supination -4 à -1 : en supination 0 à 5 : neutre 6 à 9 : en pronation 10 à 12 : fortement en pronation

<b>Titre : A 2 Year Prospective Cohort Study of Overuse Running Injuries : The Runner and Injury Longitudinal Study (TRAILS)</b>	
<b>Auteur et date</b>	Messier <i>et al.</i> 2018
<b>Schéma d'étude</b>	Etude de cohorte prospective Temps de suivi : 2 ans
<b>Population</b>	300 coureurs récréatifs américains inclus (128 femmes et 172 hommes) Age moyen : 41,1 ans IMC moyen : 24,2 Au total, 292 coureurs ont terminé les tests de 12 mois et 252 coureurs ont fini la période d'observation de 24 mois.
<b>Critères d'inclusion et exclusion</b>	Inclusion : avoir entre 18 et 60 ans, courir au moins 8 kilomètres par semaine, ne pas avoir subi de blessures depuis au moins 6 mois avant l'étude.  Exclusion : être enceinte, avoir eu une déchirure antérieure du ligament croisé antérieur ou une chirurgie reconstructive d'une articulation du membre inférieur ou une arthroplastie.
<b>Définition de la blessure en course à pied</b>	Les blessures de surutilisation en course à pied ont été définies et classées selon trois grades :  Grade 1 = Maintien d'une activité complète malgré les symptômes ; Grade 2 = kilométrage hebdomadaire réduit ; Grade 3 = interruption de l'entraînement pendant au moins 2 semaines.
<b>Objectifs</b>	Déterminer les facteurs de risques qui différencient les coureurs récréatifs qui ne se sont pas blessés de ceux qui ont reçu un diagnostic de blessures de surutilisation au cours d'une période d'observation de 2 ans.
<b>Facteurs de risque étudiés</b>	Caractéristiques du mouvement de l'arrière-pied :  Eversion maximale de l'arrière-pied Amplitude de mouvement de l'arrière-pied Vitesse d'éversion maximale
<b>Méthode d'évaluation</b>	Système de capture de mouvement 3D à 6 caméras qui ont échantillonné les données à 480 Hz. Les participants devaient courir avec leurs propres chaussures à leur vitesse d'entraînement sur une piste de 22,5m pendant que les mouvements étaient enregistrés. Au total, 37 marqueurs retro-réfléchissants ont été fixé sur le corps des participants ainsi que sur l'arrière-pied et la jambe pour les mouvements dans le plan frontal.

<b>Titre : Association between biomechanical and clinical/anthropometrical factors and running-related injuries among recreational runners : a 52-week prospective cohort study</b>	
<b>Auteur et date</b>	Jungmalm, Nielsen <i>et al.</i> 2020
<b>Schéma d'étude et temps de suivi</b>	Etude de cohorte prospective Temps de suivi : 52 semaines
<b>Population</b>	224 coureurs (dont 39,6 % de femmes) Âge médian : 41 ans (35–47) IMC moyen : 22,7 ( $\pm$ 2,1)
<b>Critères d'inclusion et d'exclusion</b>	Inclusion : n'avoir subi aucune blessure musculosquelettique aux membres inférieurs au moins 6 mois avant l'examen de référence, avoir entre 18 et 55 ans, courir au moins 15 km par semaine au cours des 12 derniers mois, ne pas porter de semelles orthopédiques pendant la course, pas de grossesse en cours, ne pas avoir de diabète.
<b>Définition de la blessure en course à pied</b>	« Douleur musculosquelettique liée à la course dans les membres inférieurs ou dans le dos qui entraîne une restriction ou un arrêt de la course (distance, vitesse, durée ou entraînement) dans plus de 66 % de toutes les séances d'entraînement sur deux semaines consécutives ou sur plus de 50 % de toutes les séances d'entraînement en quatre semaines consécutives, ou qui obligent le coureur à consulter un médecin ou un autre professionnel de la santé ».
<b>Objectifs</b>	Déterminer si les coureurs présentant certaines caractéristiques biomécaniques ou cliniques/anthropométriques subissent davantage de blessures liées à la course que les coureurs présentant d'autres caractéristiques biomécaniques ou cliniques/anthropométriques.
<b>Facteurs de risque étudiés</b>	Caractéristiques du mouvement de l'arrière-pied :  Eversion maximale de l'arrière-pied Amplitude de mouvement d'éversion Vitesse maximale d'éversion Durée d'éversion
<b>Méthode d'évaluation</b>	Système de capture de mouvement 3D à 16 caméras avec fréquence d'échantillonnage à 400Hz. Les participants devaient courir sur le sol à une vitesse prédéfinie de 3,33 m/s. Des marqueurs rétro réfléchissants ont été appliqués selon les recommandations de l'ISB. Dix foulées étaient collectées pour chaque jambe. Par la suite, les participants devaient garder leurs habitudes d'entraînements et à rapporter leurs charges d'entraînements et s'ils sentaient qu'ils étaient blessés toutes les semaines pendant 52 semaines de suivi.

<b>Titre : Comparison of ankle kinematics and ground reaction forces between prospectively injured and noninjured collegiate cross-country runners</b>	
<b>Auteur et date</b>	Kuhman <i>et al.</i> 2016
<b>Schéma d'étude et temps de suivi</b>	Etude de cohorte prospective Temps de suivi : 3 mois
<b>Population</b>	24 coureurs de cross-country de division 1 de NCAA aux Etats-Unis Age moyen : 19,7 ans IMC moyen : 20,3 Total = 19 coureurs (8 femmes et 11 hommes) après exclusion de blessures traumatiques
<b>Critères d'exclusion</b>	Inclusion : programme d'entraînement similaire (volume, périodisation, intensité), tous les coureurs s'entraînaient avec les mêmes chaussures pendant la majorité de leur temps d'entraînement, aucune blessure aux membres inférieurs au moment des tests et au cours des six derniers mois
<b>Définition de la blessure en course à pied</b>	Non précisé
<b>Objectifs</b>	Le but de cette étude était de comparer de manière prospective les variables de la force de réaction de l'articulation de la cheville et du sol entre les coureurs collégiaux qui ont développé des blessures pendant la saison de cross-country et ceux qui n'en ont pas subi
<b>Facteurs de risque</b>	Caractéristiques du mouvement de l'arrière-pied :  Amplitude de mouvement d'éversion Eversion maximale de l'arrière-pied Vitesse maximale d'éversion Durée d'éversion
<b>Méthode d'évaluation</b>	Système de capture de mouvement 3D à 8 caméras avec une fréquence d'échantillonnage à 240 Hz à l'aide marqueurs réfléchissants disposés sur le corps des participants. Les participants ont ensuite dû courir sur une piste de 25m à une vitesse approximative d'entraînement de 4,0 m/s pour les femmes et de 4,5 m/s pour les hommes. Si la vitesse n'était pas respectée, l'essai était annulé. 2 ou 3 essais d'entraînement ont été réalisés puis 10 essais ont été enregistrés. Ils devaient porter leurs propres chaussures de course et elles étaient similaires entre les coureurs suite à un partenariat. Suite à ces mesures, les athlètes ont poursuivi leur saison de cross-country jusqu'à la fin du suivi.

Titre : <b>Factors contributing to Medial Stress Syndrome in Runners : a prospective study</b>	
<b>Auteur et date</b>	Becker, Nakajima and Wu 2018
<b>Schéma d'étude</b>	Etude de cohorte prospective Durée de suivi : 2 ans
<b>Population</b>	Total = 24 coureurs de cross-country de division 1 de NCAA aux Etats-Unis Age moyen : 19,5 ans IMC moyen : non précisé Après exclusion, 18 coureurs : 7 coureurs blessés (4 femmes et 3 hommes) et 11 (5 femmes et 6 hommes) non-blessés
<b>Critères d'inclusion</b>	Ne pas avoir de blessures au moment de l'étude
<b>Définition de la blessure en course à pied</b>	Non précisé
<b>Objectifs</b>	Evaluer de manière prospective les différences d'amplitudes de mouvement, force musculaire, répartition de la pression plantaire et de la cinématique de course entre les coureurs qui ont développé un syndrome de stress tibial médial et ceux qui ne l'ont pas développé.
<b>Facteurs de risque</b>	Caractéristiques du mouvement de l'arrière-pied :  Eversion maximale de l'arrière-pied Durée d'éversion Vitesse d'éversion
<b>Méthode d'évaluation des facteurs de risque</b>	Système de capture de mouvement à 12 caméras avec une fréquence d'échantillonnage à 200 Hz à l'aide de marqueurs rétro réfléchissants disposés sur le corps des participants. Les participants pouvaient s'échauffer pendant 5 minutes et ensuite ils devaient courir pendant 10 minutes sur un tapis roulant à une vitesse prédéfinie de 3,08 m/s proche de leur vitesse d'entraînement. Les données étaient capturées lors de la dernière minute du test.  Suite à ces mesures, les athlètes ont effectué leurs saisons et leurs entraînements habituels sur la période de suivi de deux ans.

<b>Titre : A prospective comparison of lower extremity kinematics and kinetics between injured and non-injured collegiate cross-country runners</b>	
<b>Auteur et date</b>	Dudley <i>et al.</i> 2017
<b>Schéma d'étude</b>	Etude de cohorte prospective Temps de suivi : 3 mois
<b>Population</b>	31 coureurs américains (15 hommes et 16 femmes) de cross-country de la division 1 NCAA aux Etats-Unis
<b>Critères d'exclusion</b>	Exclus s'ils étaient actuellement diagnostiqués d'une pathologie provoquée par la course ou s'ils en avaient subi une dans les 6 mois précédant l'étude.
<b>Définition de la blessure en course à pied</b>	« Plainte musculosquelettique des membres inférieurs ou du dos causée par la course à pied entraînant une restriction de participation à une séance d'entraînement complète »
<b>Objectifs</b>	Comparer prospectivement la cinématique et la cinétique de la cheville, du genou et de la hanche ainsi que les caractéristiques de la force de réaction au sol entre des coureurs de cross-country blessés et non blessés au cours d'une saison.
<b>Facteurs de risque</b>	Caractéristiques du mouvement de l'arrière pied :  Eversion maximale de l'arrière-pied Vitesse d'éversion Amplitude de mouvement d'éversion
<b>Méthode d'évaluation</b>	<p>Système de capture de mouvement 3D à 9 caméras avec une fréquence d'échantillonnage à 240 Hz à l'aide de marqueurs rétro réfléchissants disposés sur le corps des participants.</p> <p>Les participants avaient leurs propres chaussures d'entraînements et ils ont pu s'échauffer pendant 5 minutes sur un tapis roulant à la vitesse de leur choix. Par la suite, ils devaient courir sur une piste de 20m à leur vitesse d'entraînement et ils pouvaient réaliser 5 essais d'entraînements avant de réaliser les essais finaux. A la suite de ces mesures, les participant étaient invités à suivre leurs entraînements et leurs compétitions habituelles durant tout le suivi.</p>

## Annexe 2 : Traduction française de la Newcastle Ottawa Scale

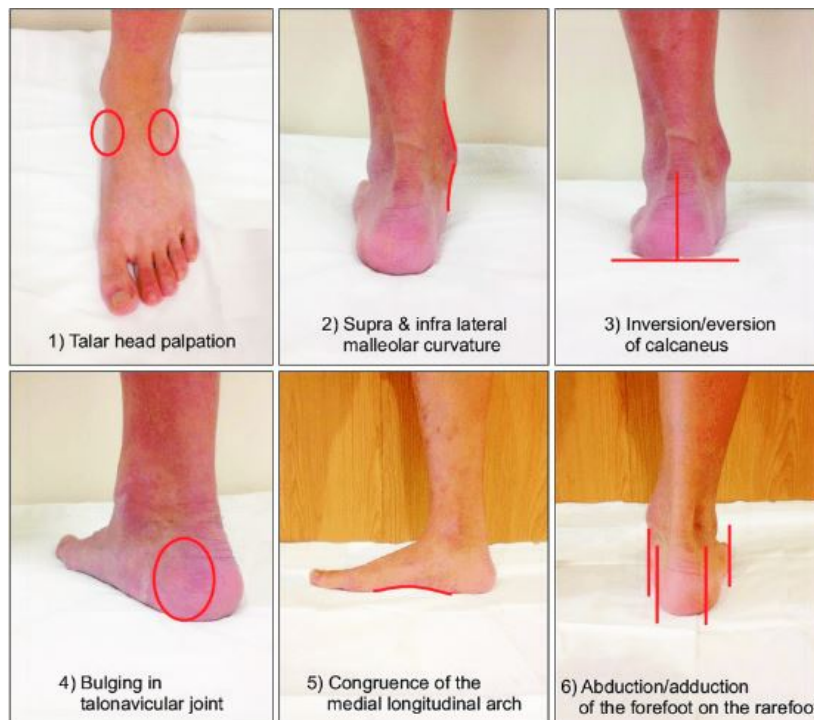
**Tableau I. Traduction française de la Newcastle-Ottawa Scale.**

Catégories d'items	Items	Cotation
Sélection (maximum 4 étoiles)	Représentativité des sujets exposés (maximum 1 étoile)	(1 étoile) Vraiment représentatif de la population cible en moyenne dans la communauté
		(1 étoile) Un peu représentatif de la population cible en moyenne dans la communauté
	Sélection des sujets non exposés (maximum 1 étoile)	(0 étoile) Groupe d'utilisateurs sélectionné (infirmiers, volontaires, etc.)
		(0 étoile) Pas de description de la constitution de la cohorte
Détermination de l'exposition (maximum 1 étoile)	Démonstration que le critère de jugement d'intérêt était absent au début de l'étude (maximum 1 étoile)	(1 étoile) Issus de la même communauté que les sujets exposés
		(0 étoile) Issus d'une source différente
	Détermination de l'exposition (maximum 1 étoile)	(0 étoile) Pas de description de la constitution des groupes des sujets non exposés
		(1 étoile) Dossier fiable (comme les dossiers chirurgicaux)
Comparabilité (maximum 2 étoiles)	Comparabilité des sujets exposés et non exposés sur la base du schéma d'étude ou de l'analyse	(1 étoile) Entretien structuré
		(0 étoile) Auto-déclaration écrite
Critère de jugement (maximum 3 étoiles)	Évaluation du critère de jugement (maximum 1 étoile)	(0 étoile) Pas de description
		(1 étoile) Oui
	Le suivi a-t-il été suffisamment long pour que le critère de jugement se produise ? (maximum 1 étoile)	(0 étoile) Non
		(1 étoile) L'étude contrôle le facteur le plus important
Adéquation du suivi des sujets (maximum 1 étoile)	Adéquation du suivi des sujets (maximum 1 étoile)	(1 étoile) L'étude contrôle tout facteur supplémentaire (ce critère pourrait être modifié pour indiquer un contrôle spécifique d'un deuxième facteur important)
		(1 étoile) L'étude contrôle le facteur le plus important
	Adéquation du suivi des sujets (maximum 1 étoile)	(1 étoile) Évaluation indépendante en aveugle
		(1 étoile) Chânage des données
Adéquation du suivi des sujets (maximum 1 étoile)	Adéquation du suivi des sujets (maximum 1 étoile)	(0 étoile) Auto-évaluation/déclaration
		(0 étoile) Pas de description
	Adéquation du suivi des sujets (maximum 1 étoile)	(1 étoile) Oui (choisir une période de suivi adéquate pour le critère d'intérêt)
		(0 étoile) Non
Adéquation du suivi des sujets (maximum 1 étoile)	Adéquation du suivi des sujets (maximum 1 étoile)	(1 étoile) Suivi complet – tous les sujets ont été suivis
		(1 étoile) Perdus de vue peu susceptibles d'introduire un biais (peu de perdus de vue, pourcentage de suivi adéquat (et préciser le taux jugé adéquat) ou description des perdus de vue fournis)
	Adéquation du suivi des sujets (maximum 1 étoile)	(0 étoile) Taux de perdus de vue supérieur au taux adéquat et absence de description des perdus de vue
		(0 étoile) Aucune information rapportée








### Annexe 3 : Foot Posture Index






<b>Rearfoot Score</b>	<b>-2</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Talar head palpation	Talar head palpable on lateral side/ but not on medial side	Talar head palpable on lateral side/ slightly palpable on medial side	Talar head equally palpable on lateral and medial side	Talar head slightly palpable on lateral side/ palpable on medial side	Talar head not palpable on lateral side/ but palpable on medial side
Curves above and below the malleoli	Curve below the malleolus either straight or convex	Curve below the malleolus concave, but flatter/ more shallow than the curve above the malleolus	Both infra and supra malleolar curves roughly equal	Curve below malleolus more concave than curve above malleolus	Curve below malleolus markedly more concave than curve above malleolus
Calcaneal inversion/eversion	More than an estimated 5° inverted (varus)	Between vertical and an estimated 5° inverted (varus)	Vertical	Between vertical and an estimated 5° everted (valgus)	More than an estimated 5° everted (valgus)
<b>Forefoot Score</b>	<b>-2</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Talo-navicular congruence	Area of TNJ markedly concave	Area of TNJ slightly, but definitely concave	Area of TNJ flat	Area of TNJ bulging slightly	Area of TNJ bulging markedly
Medial arch height	Arch high and acutely angled towards the posterior end of the medial arch	Arch moderately high and slightly acute posteriorly	Arch height normal and concentrically curved	Arch lowered with some flattening in the central portion	Arch very low with severe flattening in the central portion – arch making ground contact
Forefoot abd/adduction	No lateral toes visible. Medial toes clearly visible	Medial toes clearly more visible than lateral	Medial and lateral toes equally visible	Lateral toes clearly more visible than medial	No medial toes visible. Lateral toes clearly visible







## Annexe 4 : Programme de renforcement des muscles extrinsèques et intrinsèques du pied

**Table S1** - Exercises included in the supervised sessions by a physiotherapist.

Name	Execution	Training Volume	Progression	Progression Parameter	Approximate Duration
<p>Massage</p> 	Sitting, with leg crossed over the other, massage the sole of your feet with both hands, for 20 seconds. Rub your foot in a circular motion using your thumb. Do the same on the other foot.	1 set of 20 seconds each foot	-	-	40 Seconds
<p>Toes manipulation</p> 	Sitting, with leg crossed over the other, hold each toe and slowly spin side to side, like a screw. Do with all toes.	1 set of 10 times each finger	-	-	1 minute
<p>Rubber ball slide</p> 	Slowly slide your foot on the ball throughout the foot sole from the heel to the fingertips.	1 set of 30 seconds each foot	-	-	1 minute
<p>Feet tapping</p> 	With the heel fixed, tap your foot as fast as possible. Starts seated on a chair, and do with both feet at the same time. After you learn, do the same tapping standing.	1 set of 30 repetitions	1: 1x30 repetitions; 2: 2x30 repetitions; 3: 2x40 repetitions	Being able to perform the set without pain or muscle cramp after the completion of the set.	1-2 minutes
<p>Forefoot ascend</p> 	Standing, ascend and descend on forefoot. Start standing, using both feet. Use a chair or table to keep balance.	1 set of 30 repetitions	1: 1x30 repetitions; 2: 2x30 repetitions; 3: 2x40 repetitions	Being able to perform the set without pain or muscle cramp after the completion of the set.	1-2 minutes

<p><b>Invert/Evert asymmetric</b></p> 	<p>Sitting, with 90 degrees of knee and ankle flexion, perform asymmetrical foot inversion (lifting medial side) and eversion (lifting lateral side).</p>	<p>1 set of 10 repetitions maintaining each position for 1 second.</p>	<p>1: Sitting: 1x10 repetitions; 2: Standing: 1x10 repetitions ; 3: Standing 1x20 repetitions maintaining each position for 2 seconds.</p>	<p>Being able to perform the set without pain or muscle cramp after the completion of the set, and without loss of balance.</p>	<p>1-2 minutes</p>
<p><b>Foot abduction</b></p> 	<p>Standing, using a resistance band around the forefoot, perform foot abduction and return to the original position</p>	<p>2 sets of 10 repetitions each foot</p>	<p>1: 2x10 repetitions; 2: 4x10 repetitions; 3: 6x10 repetitions.</p>	<p>Being able to perform the set without pain or muscle cramp after the completion of the set.</p>	<p>1-6 minutes</p>
<p><b>Toes and ankle flexion</b></p> 	<p>Sitting posture, using a resistance band around the forefoot, perform ankle and toes flexion and return to the original position</p>	<p>1 sets of 10 repetitions each foot</p>	<p>1: 1x10 repetitions; 2: 2x10 repetitions; 3: 3x10 repetitions.</p>	<p>Being able to perform the set without pain or muscle cramp after the completion of the set.</p>	<p>1-3 minutes</p>
<p><b>Grab and hold squeeze ball</b></p> 	<p>Grab and hold a squeeze ball with all the toes, raise it from the floor and place it back to it's original position. Always keep the heel fixed on the ground.</p>	<p>1 sets of 5 repetitions each foot holding the ball for 5 seconds</p>	<p>1: Sitting posture 1x5 repetitions; 2: Standing posture 2x5 repetitions; 3: Standing posture 3x5 repetitions.</p>	<p>Being able to perform the set without pain or muscle cramp after the completion of the set.</p>	<p>2-6 minutes</p>
<p><b>Squeeze toes separators</b></p> 	<p>Sitting position, with 90 degrees of knee and ankle flexion, adduct and abduct, squeeze the toes separators for one second always keeping the heel fixed on the ground.</p>	<p>1 sets of 10 repetitions each foot</p>	<p>1: 1x10 repetitions; 2: 2x10 repetitions; 3: 3x10 repetitions.</p>	<p>Being able to perform the set without pain or muscle cramp after the completion of the set.</p>	<p>2-6 minutes</p>



<p><b>Squeeze ball with little toes</b></p> 	<p>Grab and hold a squeeze ball with the metatarsophalangeal region and place it back to the starting position.</p>	<p>1 sets of 5 repetitions each foot holding the ball for 5 seconds</p>	<p>Progression requires raising squeeze balls hardness.</p>	<p>Being able to perform the set without pain or muscle cramp after the completion of the set and being able to hold abduction for the stipulated time.</p>	<p>2 minutes</p>
<p><b>Toes Abduction/adduction</b></p> 	<p>Sitting position, with 90 degrees of knee and ankle flexion, adduct and abduct toes holding each position for 2 seconds.</p>	<p>1 sets of 10 repetitions each foot holding abduction for 2 seconds and adduction for 2 seconds.</p>	<p>1: Sitting posture 1x10 repetitions; 2: Standing posture 2x10 repetitions; 3: Standing posture 2x10 repetitions holding abduction/adduction for 5 seconds.</p>	<p>Being able to perform the set without pain or muscle cramp after the completion of the set and being able to hold abduction for the stipulated time.</p>	<p>1-2 minutes</p>
<p><b>Short-foot exercise</b></p> 	<p>Sitting, with 90 degrees of knee and ankle flexion, approximate the head of the first metatarsal toward the heel without toe flexion, "shortening" the feet. The forefoot and heel should not get off the ground.</p>	<p>1 set of 10 repetitions each foot, maintaining 5 seconds each contraction.</p>	<p>1: Sitting 1x10 repetitions; 2: Standing 1x10 repetitions; 3: Single leg stance 1x10 repetitions.</p>	<p>Being able to perform the set without pain or muscle cramp after the completion of the set.</p>	<p>4-6 minutes</p>
<p><b>Plantar arch raise</b></p> 	<p>Sitting, raise the plantar arch in an arch shape. The heel and fingertips should not get off the ground.</p>	<p>1 set of 10 repetitions each foot, maintaining 5 seconds each contraction.</p>	<p>1: Sitting 1x10 repetitions; 2: Standing 1x10 repetitions; 3: Single leg stance 1x10 repetitions.</p>	<p>Being able to perform the set without pain or muscle cramp after the completion of the set.</p>	<p>4-6 minutes</p>

## Annexe 5 : Traduction française de l'échelle AMSTAR-2

**Tableau I. Traduction française de AMSTAR-2.**

Items	Cotation
1	Est-ce que les questions de recherche et les critères d'inclusion de la revue ont inclus les critères PICO ?
2	Est-ce que le rapport de la revue contenait une déclaration explicite indiquant que la méthode de la revue a été établie avant de conduire la revue ? Est-ce que le rapport justifiait toute déviation significative par rapport au protocole ?
3	Les auteurs ont-ils expliqué leur choix de schémas d'étude à inclure dans la revue ?
4	Les auteurs ont-ils utilisé une stratégie de recherche documentaire exhaustive ?
5	Les auteurs ont-ils effectué en double la sélection des études ?
6	Les auteurs ont-ils effectuée en double l'extraction des données ?
7	Les auteurs ont-ils fourni une liste des études exclues et justifié les exclusions ?
8	Les auteurs ont-ils décrit les études incluses de manière suffisamment détaillée ?
9	Les auteurs ont-ils utilisé une technique satisfaisante pour évaluer le risque de biais des études individuelles incluses dans la revue ?
10	Les auteurs ont-ils indiqué les sources de financement des études incluses dans la revue ?
11	Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs ont-ils utilisé des méthodes appropriées pour la combinaison statistique des résultats ?
12	Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs ont-ils évalué l'impact potentiel des risques de biais des études individuelles sur les résultats de la méta-analyse ou d'une autre synthèse des preuves ?
13	Les auteurs ont-ils pris en compte le risque de biais des études individuelles lors de l'interprétation / de la discussion des résultats de la revue ?
14	Les auteurs ont-ils fourni une explication satisfaisante pour toute hétérogénéité observée dans les résultats de la revue, et une discussion sur celle-ci ?
15	S'ils ont réalisé une synthèse quantitative, les auteurs ont-ils mené une évaluation adéquate des biais de publication (biais de petite étude) et ont discuté de son impact probable sur les résultats de la revue ?
16	Les auteurs ont-ils rapporté toute source potentielle de conflit d'intérêts, y compris tout financement reçu pour réaliser la revue ?

**Titre :** LA PRONATION DU PIED DANS LE RISQUE DE BLESSURES DE SURUTILISATION CHEZ LE COUREUR A PIED

**Title :** FOOT PRONATION IN THE RISK OF OVERUSE INJURIES IN RUNNERS

**Introduction :** Les blessures en course à pied sont un enjeu de santé publique de par le nombre grandissant de la population la pratiquant. La posture et la cinématique du pied, particulièrement au niveau de l'arrière-pied, sont au cœur de controverses sur leur rôle dans l'apparition de blessures liées à la course. Il est la première interface avec le sol et il va être responsable de l'absorption adéquate des contraintes. A ce jour de nombreuses questions se posent encore à son sujet tant du côté des patients que des professionnels de santé.

**Objectifs :** Le but de cette revue de littérature est d'étudier le lien entre la posture et les mouvements de l'arrière-pied notamment la pronation et l'apparition de blessures liées à la course.

**Méthode :** Le critère de jugement est l'apparition de blessures liées à la course à pied. Afin d'inclure à notre revue le plus d'articles éligibles à nos critères d'inclusion et d'exclusion, quatre bases de données ont été investiguées telles que Pubmed, Cochrane Library, ScienceDirect et Google Scholar. Au total, sept études de cohortes et une étude cas-témoins ont été incluses.

**Résultats/Discussion :** Malgré des résultats significatifs, les résultats contradictoires et les biais rencontrés ne permettent pas de prouver un lien avéré concernant la posture statique et la cinématique de l'arrière-pied avec l'apparition de blessures liées à la course à pied. D'autres études de cohortes sont nécessaires afin d'appuyer ces résultats. Il faudrait également porter ces études sur plusieurs facteurs de risque car les blessures sont multifactorielles et cibler son analyse sur une population de coureurs précise et une pathologie spécifique car chaque physiopathologie est différente.

**Background :** Running injuries are a public health issue due to the increasing number of people who run. Foot posture and kinematics, particularly in the rearfoot, are the focus of controversy regarding their role in the development of running injuries. The foot is the primary interface with the ground and is responsible for adequate stress absorption. To this day, many questions are still being asked about it by both patients and health professionals.

**Objectives :** The aim of this literature review is to study the link between posture and rearfoot kinematics, particularly pronation, and the occurrence of running injuries.

**Method :** The criterion of judgment is the occurrence of running-related injuries. In order to include as many eligible articles as possible that met our inclusion and exclusion criteria, four databases were investigated, such as Pubmed, Cochrane Library, ScienceDirect and Google Scholar. In total, seven cohort studies and one case-control study were included.

**Results/Discussion :** Conflicting results and biases encountered do not support a proven association static posture and rearfoot kinematics with the development of running-related injuries. However, further cohort studies are needed to support these findings. These studies should also focus on several risk factors because injuries are multifactorial and target its analysis on a specific population of runners and a specific pathology because each pathophysiology is different.

**Mots clés :** course à pied, pronation du pied, cinématiques de l'arrière- pied, blessures liées à la course

**Keywords :** running, foot pronation, rearfoot kinematics, running related injuries