



Avertissement

Ce document est le fruit d'un long travail et a été validé par l'auteur et son directeur de mémoire en vue de l'obtention de l'UE 28, Unité d'Enseignement intégrée à la formation initiale de masseur kinésithérapeute.

L'IFMK de Nancy n'est pas garant du contenu de ce mémoire mais le met à disposition de la communauté scientifique élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : secretariat@kine-nancy.eu

Liens utiles

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F23431>

MINISTÈRE DE LA SANTÉ

RÉGION GRAND EST

INSTITUT LORRAIN DE FORMATION DE MASSO-KINÉSITHÉRAPIE DE NANCY

**ÉTUDE BIOMÉCANIQUE DES MEMBRES INFÉRIEURS DANS LE PLAN
SAGITTAL LORS D'UNE TRANSITION À DES CHAUSSURES MINIMALISTES
OU PIEDS-NUS CHEZ LES COUREURS CONFIRMÉS HABITUELLEMENT
CHAUSSÉS.**

UNE REVUE SYSTÉMATIQUE.

Mémoire présenté par **Adrien DOOMUN**,
étudiant en 4^{ème} année de masso-
kinésithérapie, en vue de l'obtention du
Diplôme d'État de Masseur-Kinésithérapeute
2015-2019.



UE 28 - MÉMOIRE
DÉCLARATION SUR L'HONNEUR CONTRE LE PLAGIAT

Je soussigné(e),

Certifie qu'il s'agit d'un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Je certifie, de surcroît, que je n'ai ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets.

Conformément à la loi, le non-respect de ces dispositions me rend passible de poursuites devant le conseil de discipline de l'ILFMK et les tribunaux de la République Française.

Fait à Nancy, le

Signature

RÉSUMÉ :

Introduction : La course à pied est le sport le plus pratiqué par les français. Les blessures liées à cette pratique sportive sont fortement corrélées aux impacts renvoyés par le sol et aux contraintes subies par les différentes articulations ainsi que les muscles. Ces forces se trouvent modifiées en fonction de la cinématique du sportif. Effectivement, une attaque au sol par l'avant-pied a été démontrée comme protectrice par rapport à une attaque par le talon. Le but de cette revue de littérature était de savoir si une transition de chaussage jouait un rôle dans la cinématique de course chez des coureurs confirmés habituellement chaussés, puis d'apprécier les variations cinétiques au niveau des membres inférieurs afin de pouvoir leur prodiguer des conseils adaptés dans le but d'éviter l'apparition de blessures liées à cette transition. Le deuxième objectif était de comprendre la biomécanique de course afin de pouvoir prévenir la récurrence chez un sportif blessé.

Matériel et Méthode : Les bases de données suivantes ont été interrogées : The Cochrane Library, PEDro, PubMed et Science Direct. Les études sélectionnées étudiaient les effets d'une transition de chaussures maximalistes à des chaussures minimalistes ou pieds nus, sur la cinématique et/ou la cinétique des membres inférieurs chez le coureur confirmé. Neuf articles ont été retenus.

Résultats : Le type de chaussage influence la cinématique, qui elle-même joue un rôle sur la cinétique des membres inférieurs chez le coureur. Cependant, une grande hétérogénéité de pose de pieds a été retrouvée lors des études et tous les coureurs n'adoptent pas instinctivement une attaque en pointe (FFS) avec des chaussures minimalistes ou pieds-nus. Cela explique l'augmentation, lors de ces conditions de course sans instructions, des contraintes au niveau du genou et des forces de réaction du sol chez les coureurs en attaque talon (RFS). Les coureurs en FFS ont montré une diminution significative de ces valeurs mais ont significativement augmenté leurs contraintes au niveau de la cheville, de l'avant-pied et des muscles postérieurs de la jambe.

Discussion : Ce travail souligne l'importance de la cinématique des membres inférieurs lors des différentes conditions de chaussage. Des conseils concernant la foulée ainsi que des exercices de préparation physique semblent être importants dans la prévention de survenue ou de récurrence de blessures chez le sportif effectuant la transition ou non.

Mots clés : biomécanique, course à pied, minimalisme, pieds-nus, transition.

ABSTRACT:

Introduction: Running is the most practiced sport by French people. Running related injuries are highly correlated to ground reaction forces, joints and muscles stress. These forces are modified by the kinematic of the runner. Effectively, a fore foot strike (FFS) have been shown to be more protective than a rear foot strike (RFS). The aim of this review was to determine if a transition to minimalist or barefoot running affects the kinematics of confirmed habitually shod runners. We also studied the lower limb kinetics variations to be able to give them advices during the transition to prevent injuries due to the transition. The last objective was to understand the running biomechanics to prevent recidivism of running related injuries.

Material and Method: The following data bases were interrogated: The Cochrane Library, PEDro, PubMed and Science Direct. The selected studies evaluated the effects of a transition to minimalist shoes or barefoot on the lower limb's kinematic and/or the kinetic of the confirmed runner. Nine studies were selected.

Results: The running conditions without instructions influence the kinematic that affects the kinetic of the lower limb. However, There is a big heterogeneity concerning foot strike patterns and all the runners do not adopt a FFS pattern when running with minimalist shoes or barefoot. This variation explains the augmentation of the ground reaction forces and knee forces with minimalist shoes or barefoot when runners are in a RFS pattern. These forces were lower for FFS runners, but they shoed higher forces at the ankle, the plantar-flexor muscles of the shank and to the fore foot.

Discussion: This review highlights the importance of the lower limb kinematic during barefoot or minimalist running. Instructions concerning the running pattern and physic conditioning exercises seem to be important to prevent the occurrence of running related injuries during the transition. These advices are applicable to prevent the recidivism of these injuries.

Keywords: biomechanics, running, minimalism, barefoot, transition.

RÉSUMÉ

LISTE DES ABRÉVIATIONS

1. INTRODUCTION.....	1
2. RAPPELS BIOMÉCANIQUES.....	3
2.1. Cinétique de la course à pied.....	4
2.2. Cinématique de la course à pied.....	5
3. MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	8
3.1. Définition du sujet.....	8
3.2. Stratégie de recherche bibliographique.....	8
3.3. Critères d'inclusion et d'exclusion.....	9
3.4. Résultats de la recherche bibliographique.....	10
4. RÉSULTATS.....	10
4.1. Caractéristiques des études sélectionnées.....	10
4.1.1. Population.....	11
4.1.2. Critères de jugement.....	11
4.1.3. Objectifs des études.....	12
4.2. Résultats des études sélectionnées.....	16
4.2.1. La cinématique.....	16
4.2.1.1. Au niveau de la cheville.....	16
4.2.1.2. Au niveau du genou.....	19
4.2.1.3. Au niveau de la hanche.....	20
4.2.2. La cinétique.....	20
4.2.2.1. Les forces de réaction du sol.....	20
4.2.2.2. Au niveau de la cheville.....	21
4.2.2.3. Au niveau du genou.....	23
4.2.2.4. Au niveau du pied.....	24
4.2.3. L'activité électromyographique.....	24
4.2.4. La fréquence et la longueur de pas.....	25

5. DISCUSSION.....	25
5.1. Résultats.....	26
5.2. Liens avec la Masso-Kinésithérapie.....	30
5.2.1. Chez un sportif effectuant la transition.....	30
5.2.2. Chez le patient blessé.....	32
5.3. Perspectives.....	34
5.4. Limites.....	34
6. CONCLUSION.....	35

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

2^{ème} RÉSUMÉ

LISTE DES ABRÉVIATIONS

FFA : Fédération Française d'Athlétisme.

FFS : Fore Foot Strike = attaque en pointe.

RFS : Rear Foot Strike = attaque talon.

MFS : Mid Foot Strike = attaque médio-pied.

PI : Pic d'impact.

VALR : Taux de chargement vertical moyen.

VILR : Taux de chargement vertical instantané.

1. INTRODUCTION

La course à pied, apparue avec l'émergence du genre Homo il y a environ 2 millions d'années (1), est selon la Fédération Française d'Athlétisme (FFA), le sport le plus pratiqué en ©. D'après une étude conduite en 2013 par la FFA (2), la part des coureurs par rapport à la population générale serait de 19%, soit 8,5 millions de français. Ce chiffre s'explique par le coût modéré de cette pratique et le fait de pouvoir l'exercer quasiment n'importe où. Les trois principales motivations qui poussent les personnes à se mettre à ce sport sont : « améliorer sa condition physique (58%), être en bonne santé (58%) et perdre du poids (35%) » (2).

Les bénéfices que ce sport apporte sur la santé sont nombreux et ont grandement été démontrés. Une diminution de 30 à 45% du risque de mortalité toute cause, une réduction de 45 à 70% du risque de décès pour cause de maladie cardio-pulmonaire, un risque de décès dû à un cancer diminué de 30 à 50% et le fait de courir aurait un effet protecteur concernant la mortalité due aux maladies neurologiques (3). Les coureurs tendent aussi à adopter un mode de vie plus sain comme le fait de maintenir un poids de corps normal, de ne pas fumer et d'avoir une consommation d'alcool plus modérée (3). Ce comportement permet, en plus des bienfaits de la course, de diminuer le risque de mortalité. Ce sport semble être une activité de choix afin d'améliorer ou de maintenir sa condition physique.

Cependant, la course à pied n'est pas sans risques, et l'incidence des blessures liées à cette activité est élevée, variant de 1,4 à 94,4% (4). Cet écart s'explique par le type d'étude, la définition établie des lésions musculo-squelettiques liées à la course, la population étudiée et le temps de suivi de celle-ci (5).

Selon une revue systématique comparant la proportion de blessures liées à la course chez les hommes et les femmes, la région anatomique la plus touchée du membre inférieur, deux genres confondus, serait le genou avec 28% des blessures, suivi du complexe de la cheville et du pied (26%) et du mollet (16%). La cuisse et la hanche étant de 14% et les autres lésions de 16% (6). Cette même étude précise que la proportion de blessures aux membres inférieurs ne varie pas beaucoup selon le sexe, 78% des blessures sont localisées sur ou en dessous du genou pour les hommes et 75% pour les femmes. Cependant la

répartition des blessures aux trois principales régions diffère selon le sexe. Pour la femme, 40% de blessures au niveau du genou, 19% pour le complexe cheville-pied et 16% pour le mollet. Pour les hommes, les blessures sont mieux réparties avec 31% pour le genou, 26% pour le complexe cheville-pied et 21% pour le mollet. Les deux principales pathologies sont le syndrome fémoro-patellaire (17% des blessures) et la tendinopathie d'Achille (10% des blessures). Toutefois les populations choisies dans cette revue vont du coureur débutant au triathlète confirmé.

Concernant la différence entre les populations de coureurs, une étude Néerlandaise incluant 4621 coureurs novices et confirmés, a montré que l'expérience diminuait l'incidence des blessures. En effet, les novices se blessaient presque deux fois plus que les coureurs confirmés (8,8 blessures contre 4,2 blessures par 1000h de course) (7). Une revue déjà citée ci-dessus, a elle, montré que l'incidence des blessures pouvait varier entre 3,2% chez les coureurs de cross-country à 84,9% chez les coureurs novices (4).

Selon une récente revue de la littérature, l'influence du type de chaussure sur le risque de blessure ne fait pas l'objet d'un accord commun (8). Effectivement, depuis les années 1970, nous avons pu constater l'apparition de chaussures modernes ou « maximalistes ». Dotées de semelles épaisses, elles sont destinées à amortir les forces de réactions du sol et les forces d'impacts qui sont des facteurs de risque de blessures (9). Or les études sur plateformes de force ne confirment pas cela, montrant que ces chaussures augmentent ces forces de 10 à 12% (10)(11).

Cependant, le type de chaussures influence le type de pose du pied lors de la course et les forces qui lui sont renvoyées par le sol (12)(13).

Les coureurs ayant des chaussures maximalistes, pourvues d'un « drop » (différence de hauteur entre l'arrière et l'avant de la semelle de la chaussure) important, ainsi que des technologies de stabilité et d'une grande rigidité ont tendance à prendre appui au sol par le talon, puis de dérouler le pas afin de prendre impulsion sur l'avant pied pour se propulser. On parle de « Rear Foot Strike » ou RFS. 74,9% des coureurs en endurance auraient ce type de foulée (14) (ANNEXE VIII).

À contrario, le fait de courir pieds-nus ou avec des chaussures minimalistes (15), possédant un « drop » inférieur à 4mm, sans technologies de contrôle de mouvement et une rigidité moindre, poussent les coureurs à adopter une pose de pied au sol par l'avant-pied, suivie de la plante du pied avec une pose plus ou moins importante du talon pour enfin prendre impulsion par l'avant pied. On parle alors de « Fore Foot Strike » ou FFS (13). (ANNEXE VII).

L'influence de ces deux types de pose du pied sur les chocs transmis par le sol sera développée plus bas.

La fréquence de pas est aussi une variable à prendre en compte. En augmentant de 5 à 10% la cadence préférentielle d'un coureur, nous observons une diminution de 20 à 34% d'énergie absorbée au niveau du genou, mais aussi une diminution des contraintes au niveau de la hanche. Cette diminution s'explique par le changement de pattern de course que cela implique. En effet, les coureurs tendent à adopter une course plus protectrice en réduisant leur longueur de pas, avec une flexion de genou et de cheville plus importante, diminuant le risque de blessures au niveau du genou et de la hanche (16).

Nous pouvons donc apprécier que plusieurs facteurs influencent le risque de blessures chez les coureurs. Qu'ils soient non-modifiables comme le sexe de la personne, ou modifiables, comme l'expérience, la fréquence de pas, ou encore le choix des chaussures jouant sur le type de pose du pied au sol.

2. RAPPELS BIOMECANIQUES

Concernant la biomécanique de la course à pied, elle se caractérise par des répétitions de cycles comprenant une phase d'appui et une phase d'oscillation pour chaque membre inférieur. La phase d'appui correspond au moment pendant lequel le pied entre en contact avec le sol et le moment où les orteils décollent du sol. La phase d'oscillation, se définit par la période pendant laquelle le pied n'est plus en contact avec le sol. Contrairement à la marche, la course ne comporte pas de temps de double appui, mais une phase de suspension pendant laquelle les deux pieds sont décollés du sol (17).

2.1. Cinétique de la course à pied

Chaque pose de pied génère une force de réaction du sol durant toute la phase d'appui. Celle-ci se traduit par une onde de choc qui se propage dans le corps en partant du pied.

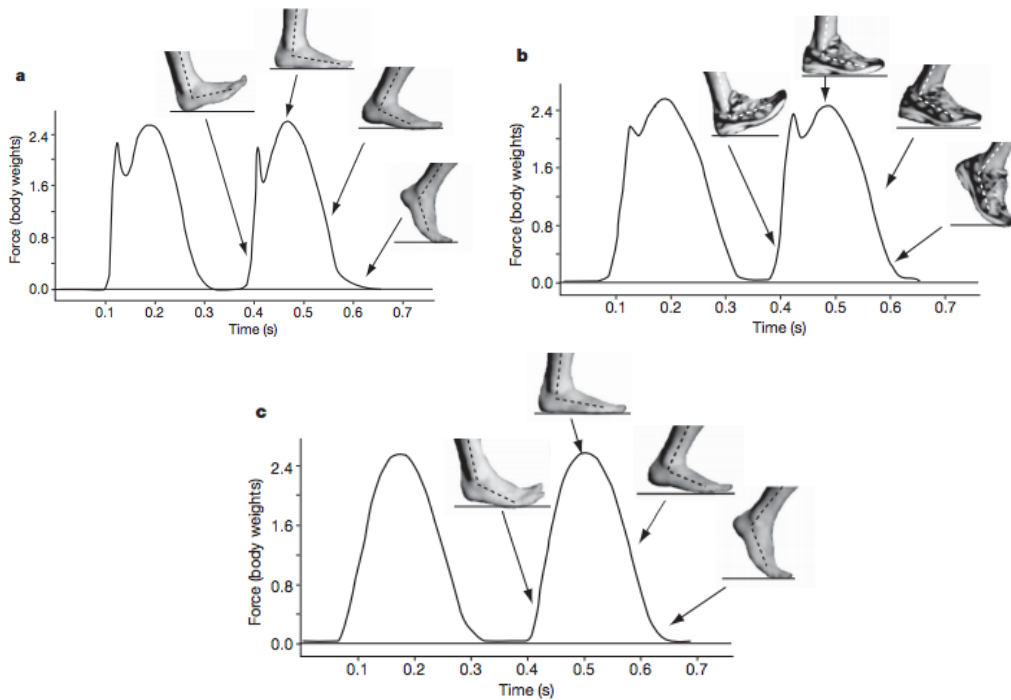


Figure 1 : Force de réaction au sol chez le coureur en RFS non-chaussé (a), chaussé (b) et en FFS non chaussé (c). (Lieberman et al. 2010)

D'après la figure 1 montrant les forces de réaction du sol pendant la course, nous pouvons remarquer l'existence d'un pic d'impact (PI) chez les coureurs en RFS. Ce pic est dû au choc transmis par la réaction du sol au talon. Sa valeur varie entre 1,8 et 2,5 fois le poids du corps (13). Puis nous pouvons apprécier un second pic qui correspond à la réaction du sol due à l'action musculaire combinée au poids de corps du coureur qui est environ égal à 2,5 fois le poids du corps (13)(18). C'est la phase de propulsion.

Ces deux pics se retrouvent lors d'une foulée en RFS, pieds nus ou chaussés. Cependant, lors d'une foulée en FFS, nous observons la disparition du PI. Cela est dû au fait que l'avant pied touche le sol en premier, ce qui crée un amorti actif grâce aux muscles fléchisseurs plantaires de cheville plutôt que passif par le talon.

La disparition du PI lors d'une foulée FFS se traduit par un taux de chargement vertical moyen (VALR) 7 fois moins élevé qu'en RFS. Ce taux de chargement, correspond à la pente de la ligne passant entre deux points de la courbe de réaction du sol. Le premier point se situe au le début de la phase d'appui et le deuxième à un instant t . En RFS, t est égal au PI et en FFS, t est égal à $6,2 \pm 3,7\%$ de la phase d'appui (13). Selon la même étude, la force d'impact à l'instant t est trois fois plus élevée en RFS qu'en FFS. C'est ce que l'on appelle le taux de chargement instantané (VILR). Le VILR correspond à la pente maximale de la courbe de réaction du sol entre le contact initial, jusqu'à l'instant t . Un taux de chargement élevé chez les coureurs en RFS augmente les risques de développer des fractures de fatigue au niveau du tibia et des aponévrosites plantaires (19). La foulée en FFS est donc moins contraignante concernant les impacts renvoyés par le sol (12)(13).

2.2. Cinématique de la course à pied

Il a été démontré que lors d'une foulée en FFS, le coureur avait une flexion plantaire de cheville et de genou plus importante qu'en RFS lors de la prise de contact avec le sol (9).

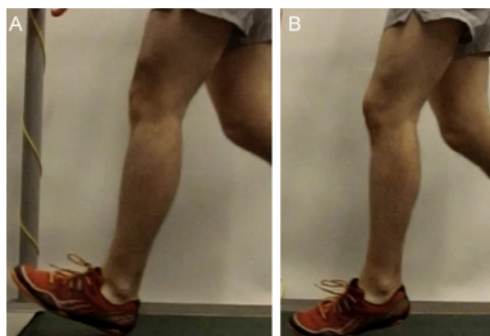


Figure 2 : RFS (A) et FFS (B). (Davis et al. 2017)

L'augmentation de flexion de genou est due à la longueur de foulée moins importante et une cadence plus élevée en FFS qu'en RFS. Cela a pour conséquence de diminuer l'amplitude articulaire du genou lors du mouvement, de modifier le bras de levier du quadriceps et de diminuer de 12 à 34% les contraintes de celui-ci sur l'articulation fémoro-patellaire et celle du genou (20)(21). Cette diminution de contraintes a pour effet de réduire les risques de développer un syndrome fémoro-patellaire (21)(22)(20).

Concernant la cheville et le pied, cette flexion plantaire change complètement les paramètres d'activation des muscles de la jambe. Effectivement, juste avant l'impact, lors de la phase d'oscillation tardive, le muscle tibial antérieur montre une activité électromyographique deux fois inférieure en FFS par rapport à une foulée en RFS. Au même moment, nous observons une pré-activation des gastrocnémiens médiaux et latéraux en FFS, ajoutée à une activité électromyographique de ces muscles trois fois supérieure par rapport à une foulée en RFS. Cette différence est due au fait que les coureurs en FFS posent le pied avec une flexion plantaire de $11^\circ \pm 5^\circ$ alors que les coureurs en RFS le posent avec une flexion dorsale de $6 \pm 4^\circ$ (23).

Le tendon d'Achille, est le tendon le plus élastique du corps et retransmet 95% de l'énergie reçue lors de son étirement. Cette pré-activation couplée au travail excentrique des muscles jumeaux lui permet donc de remplir pleinement son rôle de ressort physiologique lors d'une foulée en FFS. Le fait de stimuler ce tendon augmente ses capacités viscoélastiques en le rendant plus rigide (9). Cependant, un surmenage de celui-ci peut entraîner des tendinopathies (24)(25).

Le fait d'avoir une attaque au sol par l'avant-pied augmente aussi les contraintes au niveau de la tête des métatarses. En effet, lors d'une foulée RFS, le pourcentage de stress au niveau de ces structures sont en moyenne de 21,39% depuis la prise de contact avec le sol jusqu'à la mise en charge maximale. Alors qu'en FFS, ce taux est de 30,76%. Ce type de pose de pied est donc un facteur de risque concernant l'apparition de fractures de fatigues des tête de métatarses (25)(26).

En résumé, la foulée en FFS est protectrice concernant les forces d'impacts renvoyées par le sol, et de ce fait, diminue les contraintes au niveau de la jambe, du genou, de la hanche et de la face antérieure de la jambe. Toutefois, elle augmente les contraintes au niveau du pied et de la face postérieure de la jambe en demandant un travail plus important des muscles fléchisseurs plantaires.

Un questionnaire visant six-mille-quatre-vingt-deux coureurs a montré que 75,7% des participants souhaiteraient passer à une course en chaussures minimalistes ou pieds-nus si cela pouvait leur permettre de diminuer les risques de blessures liées à la course (27).

La plupart de ces études ont été menées sur des coureurs qui avaient l'habitude de courir soit en RFS ou en FFS, sans changer leur schéma de course. Or, de part l'influence du type de chaussage sur la pose du pied au sol et de la différence de distribution des contraintes qu'elle entraîne aux membres inférieurs, nous pouvons nous demander quels sont les effets d'une transition d'un port de chaussures maximalistes à des chaussures minimalistes ou pieds-nus sur la biomécanique des membres inférieurs chez des coureurs habituellement chaussés. De ce fait, nous pourrions établir si le masseur-kinésithérapeute aurait un rôle à jouer dans l'accompagnement du sportif lors de cette transition ou lors d'une blessure liée à ce sport.

Cela nous mène donc à notre problématique : « Quelle est l'influence de la transition de chaussures maximalistes à des chaussures minimalistes ou pieds-nus, sur la cinématique et la cinétique des membres inférieurs chez les coureurs confirmés habituellement chaussés ? Et quels sont les moyens pouvant être mis en place par le masseur-kinésithérapeute pour accompagner au mieux les coureurs, dans le but d'éviter l'apparition de blessures lors de cette transition, mais aussi de prévenir la récurrence de pathologies liées à la course chez le coureur blessé ? »

3. MATERIEL ET METHODE

3.1. Définition du sujet

L'intérêt porté à la course à pied et le fait de vouloir approfondir les mécanismes de ce sport nous ont amené à réaliser ce mémoire afin de proposer des alternatives pour prévenir les blessures chez ce type de sportif. Les thérapeutes ont tendance à traiter la blessure en elle même sans se soucier des facteurs qui l'ont provoquée. Bien que le corps humain ait d'excellents mécanismes d'adaptation, il arrive que les sportifs voient leurs blessures récidiver si le facteur de risque est toujours présent.

L'objectif de ce mémoire est de rassembler des données de la littérature pour comprendre si le masseur-kinésithérapeute a sa place dans l'accompagnement, la prévention des blessures et le conseil chez le coureur effectuant une transition vers une course minimaliste ou pieds-nus. Mais aussi dans la prise en charge, le conseil et la prévention de récurrences des blessures chez le coureur blessé.

3.2. Stratégie de recherche bibliographique

Les mots-clés utilisés pour nos recherches sont : barefoot, minimalist, transition et running.

Ceux-ci nous ont permis de constituer notre équation de recherche : ((« barefoot » OR « minimalist ») AND (« running ») AND (« transition »)) afin de pouvoir entamer la sélection des articles. Les recherches ont été effectuées du 01/03/2019 au 07/04/2019 grâce aux bases de données suivantes : Cochrane Library, Pubmed, PEDro et Science Direct.

Le HeTOP de Cismef nous a aidé à trouver la traduction des mots clés ci-dessus.

Nous avons décidé de conserver les articles ayant été publiés entre 2014 et 2019. Ces articles devaient avoir un niveau de preuve inférieur ou égal à deux. La grille d'analyse de la littérature de l'ANAES (HAS) nous a permis d'effectuer cette gradation (ANNEXE I).

Les recherches se sont déroulées en trois temps. Le premier temps consistait, par la lecture du titre des articles, de constituer une première sélection en fonction des critères d'inclusion. Ensuite, la lecture du résumé permettait de constituer une deuxième sélection. Pour finir, une lecture complète des articles nous a permis d'établir une troisième est dernière sélection avant l'évaluation du niveau de preuve.

3.3. Critères d'inclusion et d'exclusion

Critères d'inclusion des études :

Lors de la première sélection, nous avons retenu les articles en anglais ou en français uniquement et évoquant la transition d'une course à pied avec des chaussures « normales » à une course à pied en chaussures minimalistes ou pieds-nus.

La lecture des résumés nous a permis d'établir une deuxième sélection selon les critères de jugement des études. Celles-ci devaient évaluer la cinématique et/ou la cinétique des membres inférieurs chez les coureurs habituellement chaussés en RFS, n'ayant aucune expérience de course en chaussures minimalistes ou pieds-nus.

Pour finir, la lecture complète des articles nous a permis de les sélectionner ou non en fonction du protocole utilisé et de la puissance de l'étude.

Critères d'exclusion des études :

Les études étaient exclues si elles étaient rédigées ni en français, ni en anglais, si elles ne parlaient pas de transition de chaussage lors de la course à pied et si elles étaient publiées avant 2014.

L'analyse des résumés nous a permis de voir si les études présélectionnées évaluaient les critères de jugement définis chez la population cible. Étaient exclues les études n'évaluant pas la cinétique ou la cinématique des membres inférieurs chez la population choisie.

Les derniers articles à être exclus étaient ceux ayant un protocole jugé non fiable et ayant un niveau de preuve supérieur à trois selon la grille d'analyse de la littérature de la HAS.

3.4. Résultats de la recherche bibliographique

La démarche de sélection des articles pour cette revue de littérature est illustrée par un diagramme de flux (ANNEXE II).

Notre équation de recherche nous a permis d'interroger les différentes bases de données citées au dessus et d'en ressortir mille quatre articles. Après lecture des titres, vérification des dates de publication et du type d'étude, le nombre d'articles retenus pour la lecture des résumés était de seize. Deux articles n'évaluaient pas la cinématique ou la cinétique des membres inférieurs, nous les avons donc exclus afin d'en garder quatorze pour la lecture intégrale. Lors cette dernière lecture, nous nous sommes aperçus que deux des quatorze études n'évaluaient pas les différentes conditions de chaussage sur le même type de sol. Cela nous a paru être un biais trop important et nous les avons exclues. Deux autres études portaient sur des populations qui ne respectaient pas nos critères d'inclusion. Ce qui nous a amené à une sélection de dix articles pour l'analyse méthodologique, durant laquelle nous avons exclu un article car ayant un niveau de preuve trop bas.

4. RESULTATS

4.1. Caractéristiques des études sélectionnées

Au total, neuf études ont été retenues pour cette revue de littérature contenant huit études transversales et une étude longitudinale. Les neuf études ont été évaluées à un grade B. Le Tableau I montre les principales caractéristiques de ces études. Des fiches de lecture ont été rédigées afin d'analyser correctement les articles. Un exemple est consultable en ANNEXE VI.

4.1.1. Population

Les différentes études regroupent deux-cent quarante-sept participants comprenant cent-soixante-six hommes (67%) et quatre-vingt-une femmes (33%) allant de quinze à soixante-neuf ans. Tous les participants étaient des coureurs confirmés avec un minimum de temps ou de kilométrage de course à respecter lors des critères d'inclusion.

La plupart des études ont effectuées leurs mesures sur des sujets sains, sans blessures durant les trois à douze derniers mois. Cependant, l'étude de Samaan *et al.* (28) incluait seulement des sujets blessés en attente de traitement pour une douleur chronique au niveau des membres inférieurs.

Concernant l'expérience en course minimaliste ou pieds-nus, seules les études de Bergstra *et al.* (29) et de Sinclair (30) n'ont pas renseigné si leurs participants avaient déjà essayés ce type de course. Les études restantes demandaient à ce que les participants n'aient aucune expérience en minimalisme ou pieds-nus.

4.1.2. Critères de jugement

Toutes les études sélectionnées évaluaient la cinétique et la cinématique des membres inférieurs, à l'exception de l'étude de Bergstra *et al.* (29) qui n'évaluait que la cinétique et le confort des chaussures.

La cinétique était évaluée à l'aide de plateformes de force dans toutes les études sauf pour celle de Bergstra *et al.* (29), qui utilisait une semelle dotée de capteurs de pression afin de pouvoir différencier les zones de contraintes au niveau de la plante du pied. Lorsque la cinématique était prise en compte, elle était appréciée visuellement dans les études de Cheng *et al.* (31) et de Samaan *et al.* (28), contrairement aux autres auteurs qui utilisaient des capteurs de mouvement.

L'activité électromyographique des muscles a aussi été évaluée dans l'étude de Fleming *et al.* (32), à l'aide d'électrodes cutanées.

4.1.3. Objectifs des études

Les objectifs des études étaient de déterminer les différences au niveau des membres inférieurs entre une course avec des chaussures maximalistes et une course en chaussures minimalistes ou pieds-nus. Ce qui différenciait ces dernières était la zone étudiée. Le Tableau II illustre les différentes zones du corps étudiées en fonction des critères de jugement.

Tableau I : Résumé des caractéristiques des études.

Auteurs	Grade de l'étude	Type d'étude	Population	Critères de jugement	Protocole	But de l'étude
Bergstra <i>et al.</i> (2015) (29)	B	Transversale randomisée interventionnelle.	18 coureuses 18-55 ans, courant au moins 10km par semaine. Sans troubles cardiovasculaires durant les 12 derniers mois ni blessures.	Principal : Pression plantaire (pic de pression, pression moyenne maximale). Secondaires : Temps d'appui et d'oscillation, confort de la chaussure.	Mesure de la pression plantaire sur sept régions du pied grâce à des semelles de pression.	Mesurer les différences de pressions plantaires au niveau du pied entre une course en chaussures minimalistes et en chaussures classiques chez des femmes en bonne santé.
Cheung <i>et al.</i> (2014) (31)	B	Transversale randomisée interventionnelle.	30 coureurs (18 hommes) 20-30 ans Au moins 30km/semaine et sans expérience en minimalisme ou pieds-nus.	Principal : Réaction verticale du sol. Secondaire : Cinématique du membre inférieur.	Mesure des données cinématiques sur une plateforme de force. Mesure des données cinématiques grâce à une caméra.	Déterminer les effets d'une première course pieds-nus chez de coureurs habituellement chaussés.

Firminger <i>et al.</i> (2016) (33)	B	Transversale interventionnelle.	14 hommes en RFS. 18-35 ans. Au moins 10km/semaine Pas de blessures Pas d'expérience en minimalisme.	Principal : cinématique du membre inférieur. Secondaire : cinétique du membre inférieur.	Mesure de la vitesse avec un pistolet stroboscopique. Mesure de la cinématique grâce à des capteurs de mouvement. Mesure de la pression plantaire avec des semelles de pression. Mesure de la cinétique avec une plateforme de force.	Examiner les effets du type de chaussure et la réduction de longueur de foulée (sans instructions sur la pose de pied) sur la mécanique de course au niveau des membres inférieurs et de la charge cumulée.
Fleming <i>et al.</i> (2015) (32)	B	Transversale randomisée interventionnelle.	10 hommes 21-27 ans 180 min de course par semaine. Pas d'expérience en minimalisme ou pieds-nus.	Principal : cinématique du membre inférieur. Secondaire : cinétique du membre inférieur et activité électromyographique.	Mesure de la cinématique avec des capteurs de mouvement. Mesure de l'activité EMG avec des électrodes cutanées. Mesure de la cinétique avec une plateforme de force.	Déterminer les effets d'une course pieds-nus sans instructions sur la cinématique et sur les muscles des membres inférieurs chez des coureurs habituellement chaussés.
Hashish <i>et al.</i> (2016) (34)	B	Transversale interventionnelle.	22 coureurs en RFS (9 hommes) 23-29 ans. 15-40km par semaine. Sans blessures. Sans expérience en course pieds-nus ou en minimalisme.	Principal : type de pose de pied. Secondaires : Cinétique des membres inférieurs.	Mesure de la cinématique avec des capteurs de mouvement. Mesure de la cinétique avec une plateforme de force.	Déterminer les caractéristiques biomécaniques des coureurs habituellement chaussés lors d'une rapide transition en course pieds-nus sans instructions.
Hashish <i>et al.</i> (2018) (35)	B	Longitudinale interventionnelle.	26 coureurs en RFS (11 hommes) 19-40 ans. 15-40 km par semaine. Sans blessures. Sans expérience en	Principal : cinématique des membres inférieurs. Secondaire : cinétique des membres inférieurs.	Mesure de la cinématique avec des capteurs de mouvement. Mesure de la cinétique avec une plateforme de force.	Analyser les changements de la dynamique des membres inférieurs chez des coureurs habituellement chaussés après une transition de 8 à 10 semaines

			minimalisme ou pieds-nus.			à une course pieds-nus (sans instructions sur le type de pose de pieds).
Samaan <i>et al.</i> (2014) (28)	B	Transversale interventionnelle.	46 coureurs (23 hommes) blessés. 15-69 ans. Ayant un pic d'impact. Pouvant courir 10 min sans avoir de douleurs aiguës. Sans expérience en chaussures minimalistes ou pieds-nus	Principal : cinétique des membres inférieurs. Secondaire : cinématique des membres inférieurs.	Mesure de la cinétique avec une plateforme de force. Mesure visuelle de la cinématique avec une caméra.	Déterminer les changements dans les paramètres de chargement lorsque des coureurs habituellement chaussés ayants un pic d'impact, courent pieds-nus avec des instructions visuelles et auditives.
Sinclair (2014) (30)	B	Transversale randomisée interventionnelle.	30 coureurs hommes. 21-29 ans. Courant 3 fois par semaine. Sans blessures.	Cinétique et cinématique des membres inférieurs.	Mesure de la cinétique avec une plateforme de force. Mesure de la cinématique avec des capteurs de mouvement.	Déterminer les effets de la course pieds-nus ou en chaussures minimalistes sur les forces de contact et de pression fémoro-patellaire au niveau du genou et sur les contraintes au niveau du tendon d'Achille et de la cheville.
Tam <i>et al.</i> (2016) (36)	B	Transversale interventionnelle.	51 coureurs hommes. 23-33 ans. Courant un 10km en moins de 50 minutes. Sans blessures. Pas d'expérience en minimalisme ou pieds-nus.	Cinétique et cinématique des membres inférieurs.	Mesure de la cinétique avec une plateforme de force. Mesure de la cinématique avec des capteurs de mouvements	Déterminer les effets d'une première course pieds-nus sans instructions chez des coureurs habituellement chaussés sur le taux de chargement et la biomécanique des articulations des membres inférieurs.

Tableau II : Zones corporelles et critères de jugement étudiés.

Tableau II : Zones corporelles et critères de jugement étudiés.

Auteurs	Cinétique				Cinématique			Activité	Cadence
	Pied	Cheville	Genou	Réaction sol	Cheville	Genou	Hanche	EMG	
Bergstra <i>et al.</i> (2015) (29)6									
Cheung <i>et al.</i> (2014) (31)8									
Firminger <i>et al.</i> (2016) (33)0									
Fleming <i>et al.</i> (2015) (32)9									
Hashish <i>et al.</i> (2016) (34)1									
Hashish <i>et al.</i> (2018) (35)2									
Samaan <i>et al.</i> (2014) (28)5									
Sinclair (2014) (30)7									
Tam <i>et al.</i> (2016) (36)3									

Légende : case grisée = critère étudié ; case blanche = critère non-étudié.

4.2. Résultats des études sélectionnées

4.2.1. La cinématique

4.2.1.1. Au niveau de la cheville

Lors de l'étude de Fleming *et al.* (32), il était demandé aux participants de réaliser des essais d'une minute sur un tapis roulant à trois vitesses différentes ($V1=3,13$ m/s ; $V2=3,80$ m/s ; $V3=4,47$ m/s), chaussés et pieds-nus. La vitesse et les conditions de course étaient randomisées pour chaque participant. Aucune instruction verbale n'a été donnée. Seules les données des trente dernières secondes étaient gardées, considérant que les trente premières servaient à fixer correctement la foulée. Les auteurs ont trouvé que le fait de courir pieds-nus montrait une augmentation significative de la flexion plantaire de cheville au contact initial ($V1 = -4 \pm 5^\circ$ vs. $-1 \pm 6^\circ$ | $V2 = -6 \pm 4^\circ$ vs. $-3 \pm 5^\circ$ | $V3 = -5 \pm 6^\circ$ vs. $-2 \pm 5^\circ$; $p < 0,01$), une augmentation de l'amplitude articulaire de la cheville pendant la phase d'appui ($V1 = 23 \pm 4^\circ$ vs. $20 \pm 5^\circ$ | $V2 = 26 \pm 4^\circ$ vs. $22 \pm 5^\circ$ | $V3 = 26 \pm 5^\circ$ vs. $21 \pm 4^\circ$; $p < 0,05$) et une augmentation de la flexion plantaire lors du début de la phase d'oscillation ($p < 0,05$).

Concernant l'étude de Samaan *et al.* (28), elle avait pour but de déterminer les différences entre une course chaussée et une course pieds-nus avec instructions chez des coureurs souffrant de douleurs chroniques aux membres inférieurs. Les instructions étaient dans un premier temps visuelles en montrant les forces de réaction du sol des coureurs en temps réel. Il leur était demandé d'avoir une courbe la plus lisse possible. S'ils n'y arrivaient pas, il leur était demandé de courir le plus légèrement possible. Les mesures étaient faites sur un nombre de huit pas consécutifs. Lors de la course chaussée, quarante-cinq sur quarante-neuf participants étaient en RFS (92%), deux en MFS (4%) et deux en FFS (4%). Pieds-nus, ils n'étaient plus qu'un en RFS (2%), un en MFS (2%) et quarante-sept en FFS (96%). La course en MFS signifie « Mid Foot Strike », soit une pose de pied par le médio-pied, qui est considérée comme un pose par l'avant-pied.

Dans une publication de Firminger *et al.* (33), les participants réalisaient leurs essais sur une piste de vingt-trois mètres, avec une chaussure de contrôle dotée d'un drop de huit millimètres et avec chaussure minimaliste avec un drop de 0,8 millimètres. Ils n'ont reçu aucune instruction concernant la pose de pieds à adopter. Cependant ils devaient respecter une longueur de pas préférentielle (qui était celle lors d'une course chaussée) et une longueur à 90% de la longueur préférentielle pour chaque condition de chaussage. Les résultats ont montré que lors d'une course en chaussures minimalistes avec la longueur de pas préférentielle, le moment de flexion plantaire maximal et l'accélération angulaire de la cheville ont significativement augmentés (3,8% et 7,1% respectivement ; $p \leq 0,001$). Cependant, lors de la course à 90% de la longueur de pas préférentielle, seule l'accélération angulaire a diminué (-4,1%; $p \leq 0,037$).

Le travail de Sinclair (30) comparait les effets d'une course pieds nus et avec quatre chaussures différentes. Une chaussure classique, une chaussure minimaliste et deux chaussures « barefoot ». Les essais étaient effectués sur une piste de vingt-deux mètres à une vitesse fixe de quatre mètres par seconde. Les résultats ont montré une augmentation significative de la flexion plantaire de cheville lors du contact initial avec des chaussures minimalistes et pieds-nus ($p < 0,006$). Le tableau en ANNEXE IV illustre ces résultats.

Cheng *et al.* (31) ont effectué leurs mesures en demandant aux participants de courir, à une vitesse de dix kilomètres par heure, chaussés et pieds-nus sur un tapis roulant avec plateforme de force intégrée. Les essais avec ou sans chaussures ont été randomisés. Les essais étaient entrecoupés d'un temps de récupération de quinze minutes. Ils ont pu relever que lors de la course chaussée, $99,5 \pm 1,8\%$ des coureurs étaient en foulée RFS (un seul participant sur trente ne l'était pas). Ce ratio était significativement inférieur lors de la course pieds-nus ($20,5 \pm 29,8\%$; $p < 0,001$). Sur les trente participants, vingt ont montrés une transition automatique à une foulée FFS (66,6%). Cependant, sur les dix autres participants, ils ont observé une foulée mixte avec un ratio RFS de $61,4 \pm 7,7\%$.

L'étude de Hashish *et al.* de 2016 (34) analysait les effets d'une course pieds-nus sans instructions chez vingt-deux coureurs habituellement chaussés et en RFS. Tous les participants avaient les mêmes chaussures avec un drop de huit millimètres. L'étude se décomposait en deux visites. La première servait à déterminer la cinématique, la cinétique et le type de pose de pieds des coureurs lors d'une course chaussée. La deuxième, une semaine après, évaluait les mêmes critères lors de la course pieds-nus. Au terme de cette dernière visite, les coureurs étaient répartis en trois groupes (RFS, MFS et FFS) et les données des deux tests étaient comparées. Il en est sorti que sur les vingt-deux coureurs RFS, huit sont restés en RFS, neuf sont passés en MFS et cinq en FFS. Les trois groupes ont montré une augmentation significative de la flexion plantaire de cheville lors du contact initial. Les coureurs RFS ont augmenté leur flexion plantaire de $8,4 \pm 2,8^\circ$ ($p < 0,001$), les MFS de $20,4 \pm 8,4^\circ$ ($p < 0,001$) et le FFS de $22,8 \pm 3,6^\circ$ ($p < 0,001$). Le changement de flexion plantaire entre la course chaussée et pieds-nus était significativement plus important chez les MFS et FFS que chez les RFS (MFS-RFS : $\Delta = 12,2^\circ$; $p = 0,002$ | FFS-RFS : $\Delta = 14,4^\circ$; $p = 0,001$).

L'étude de Hashish *et al.* de 2018 (35) étudiait les effets d'une transition de huit à dix semaines sans instructions concernant le type de pose de pieds chez vingt-six participants. Une première visite avant le début du protocole de transition servait recueillir les données cinétiques et cinématiques des coureurs lors d'une course chaussée et pieds-nus. Une deuxième visite post-transition avait lieu afin de comparer les données. Cette transition se faisait par une augmentation du pourcentage de course pieds-nus par semaine, pendant huit à dix semaines jusqu'à ce que toute la course se fasse pieds-nus. Huit coureurs n'ont pas complété le protocole car n'ayant pas adhéré au programme ou n'ayant pas des horaires concordants à ceux des tests. Lors de la première visite, il en est ressorti que lors d'une course pieds-nus, sur dix-huit coureurs, trois ont adopté un mode FFS, huit en MFS et sept sont restés en RFS. Cependant, après la transition, les trois FFS sont passés en MFS, sur les huit MFS, six ont gardé ce type de foulée et deux sont retournés en RFS et un RFS est passé en MFS. Ce qui fait qu'à la fin de l'étude, dix coureurs avaient adopté une course en MFS (56%), huit sont restés en RFS (44%) et aucun participant n'a adopté une foulée FFS (0%). Il est à noter que deux des coureurs initialement FFS ont éprouvé des douleurs au niveau du mollet ce qui les a poussé à changer leur foulée.

Pour l'étude de Tam *et al.* (37), les participants effectuaient six essais chaussés et six essais pieds-nus sur une piste de quarante mètres de long. Les conditions de chaussage ont été randomisées pour chaque coureur et aucune instruction ne leur a été donnée concernant la pose de pieds. Les résultats ont montré une diminution de la flexion dorsale de cheville lors du contact initial ($-2,0 \pm 9,6^\circ$ pieds-nus vs. $8,6 \pm 9,6^\circ$ chaussé ; $p < 0,0001$). Cependant cela n'a pas permis à tous les coureurs d'adopter une foulée FFS en étant pieds-nus.

4.2.1.2. Au niveau du genou

Les résultats de l'étude de Fleming *et al.* (32) en ANNEXE III, ont montré pour les trois vitesses, une augmentation de la flexion de genou au contact initial ($V1 = 19 \pm 5^\circ$ vs. $17 \pm 6^\circ$ | $V2 = 21 \pm 5^\circ$ vs. $18 \pm 6^\circ$ | $V3 = 22 \pm 5^\circ$ vs. $19 \pm 5^\circ$; $p < 0,01$) et une diminution de l'amplitude articulaire ($V1 = 23 \pm 4^\circ$ vs. $28 \pm 3^\circ$ | $V2 = 22 \pm 3^\circ$ vs. $28 \pm 2^\circ$ | $V3 = 23 \pm 5^\circ$ vs. $28 \pm 2^\circ$; $p < 0,05$).

L'étude de Firminger *et al.* (33) a montré que lors du port de chaussures minimalistes et à une longueur de pas préférentielle, il y avait une diminution de l'amplitude articulaire du genou, ainsi qu'une diminution de l'accélération angulaire au niveau de cette articulation ($-6,1\%$ et $-8,4\%$ respectivement ; $p \leq 0,021$). Lors de la course à 90% de la longueur préférentielle avec les mêmes chaussures minimalistes, cette diminution était plus importante ($-12,0\%$ et $-19,7\%$ respectivement ; $p \leq 0,037$).

Sinclair (30) (ANNEXE IV), a trouvé que le fait de courir avec des chaussures minimalistes ou pieds-nus diminuait les moments d'extension du genou comparativement à une course en chaussures conventionnelles ($p < 0,006$).

L'étude de Tam *et al.* (37) a elle aussi montré une augmentation de flexion de genou au contact initial ($15,9 \pm 6,6^\circ$ pieds-nus et $14,1 \pm 6,1^\circ$ chaussé ; $p = 0,019$).

4.2.1.3. Au niveau de la hanche

La cinématique au niveau de la hanche a seulement été étudiée lors de l'étude de Firminger *et al.* (33), montrant une diminution de l'amplitude articulaire de celle-ci ($p < 0,05$) (ANNEXE III).

4.2.2. La cinétique

4.2.2.1. Les forces de réaction du sol

L'étude de Cheung *et al.* (31) avait pour but d'analyser les taux de chargement moyens (VALR) et initiaux (VILR). Le VALR était défini comme la pente de la ligne passant entre 20 et 80% du pic d'impact ou entre le 0 et 13% de la phase d'appui lorsqu'il n'y avait pas de pic. Le VILR était la pente maximale de la courbe de réaction du sol entre deux points de données successifs, du contact initial, jusqu'au pic d'impact (ou 13% de la phase d'appui si il n'y avait pas de pic). Ces deux valeurs sont exprimées en poids de corps par seconde (BW/s). Les résultats ont montré que le VALR en étant chaussé était significativement supérieur qu'en étant pieds-nus indépendamment de la foulée adoptée (moyenne des différences avec une course pieds-nus en FFS par rapport à une course chaussée = $15,4 \pm 1,55$ N.kg/s ; $p < 0,05$) et celle avec une foulée mixte pieds-nus par rapport à une course chaussée = $11,1 \pm 1,96$ N/kg/s $p < 0,05$). En étant pieds-nus, le VALR était significativement diminué chez les coureurs complètement en FFS comparé aux coureurs avec une foulée mixte (moyenne des différences = $4,3 \pm 2,08$ N/kg/s ; $p < 0,05$). Cependant deux participants ayant adoptés une foulée FFS ont montré une augmentation du VALR et du VILR. Les effets du chaussage sur le VILR étaient similaires ($p = 0,066$).

L'étude de Hashish *et al.* de 2016 (34) a montré que lors de la course pieds-nus, les coureurs ayant continué à avoir une foulée RFS exprimaient une augmentation du taux de chargement de 108% ($\Delta = 124 \pm 69$ BW/s ; $p = 0,001$). À contrario, ceux ayant adopté une course FFS ont montré une diminution de ce taux de 41% ($\Delta = -44 \pm 24$ BW/s ; $p = 0,014$). Il n'y a pas eu de changements significatifs chez les MFS ($\Delta = 0 \pm 39$ BW/s ; $p = 0,989$). Les changements des taux de chargement à travers les conditions de course sont

significativement différents entre MFS et RFS ($\Delta = 124$ BW/s ; $p < 0,001$) et entre FFS et RFS ($\Delta = 168$ BW/s ; $p < 0,001$).

Samaan *et al.* (28) ont réalisé leurs mesures sur huit pas consécutifs pour en avoir au total trois cent quatre-vingt-douze. Lors de la course chaussée, les participants ont montré un pic d'impact pour trois cent quatre-vingt-quatre pas sur trois cent quatre-vingt-douze (98% des pas). Lors de la course pieds-nus avec instructions, seuls quatre-vingt-dix-neuf pas sur trois cent quatre-vingt-douze montraient un pic (25% des pas). Chaussés, 86% des participants ($n=42$) ont eu un impact lors des huit pas, 12% ($n=6$) durant sept pas sur huit et 2% ($n=1$) durant six pas sur huit. Pieds-nus, 47% des participants n'avaient pas de pic d'impact lors des huit pas et seulement 14% en avaient dans cinq pas ou plus. Les VALR et VILR ont montré une diminution significative pendant la course pieds-nus (57% et 51% respectivement ; $p < 0,0001$). Le VALR variait de 34,9 à 138,3 BW/s pendant la course chaussée et de 15,4 à 36,8 BW/s pendant la course pieds-nus.

L'étude de Hashish *et al.* de 2018 (35) a montré que lors de la course pieds-nus, le taux de chargement était significativement plus élevé chez les RFS que chez les FFS (166% ; $p = 0,026$).

Contrairement aux autres études, celle de Tam *et al.* (37), a montré que les taux de chargement étaient plus importants lors de la course pieds-nus ($168,4 \pm 140,6$ BW/s pieds-nus contre $91,1 \pm 53,7$ BW/s chaussés ; $p = 0,001$). Ces taux de chargement s'étendaient de 12,3 à 622,8 BW/s en étant pieds-nus et de 27,2 à 315,3 BW/s en étant chaussé. Les taux de chargement au contact initial étaient plus importants pieds-nus que chaussé ($p < 0,001$).

4.2.2.2. Au niveau de la cheville

L'étude de Hashish *et al.* de 2016 (34) a étudié l'absorption énergétique au niveau des articulations. Cette absorption correspond à la puissance articulaire négative de l'articulation lors de la phase d'absorption (= force de freinage). L'étude a montré que les coureurs qui étaient passés en MFS lors de la course pieds-nus ont montré une augmentation significative de 146% d'absorption d'énergie au niveau de la cheville ($5,0 \pm 2,5$ J/kg ; $p < 0,001$). Ceux qui sont passés à une foulée FFS ont montré une augmentation de

140% ($5,5 \pm 1,2$ J/kg ; $p = 0,001$). Les coureurs qui sont restés en RFS n'ont pas eu de changement. Le changement de l'absorption de l'énergie au niveau de la cheville à travers les conditions de course sont significativement plus importants en MFS et FFS qu'en RFS (MFS-RFS : $\Delta = 4,0$ J/kg ; $p = 0,001$ | FFS-RFS : $\Delta = 4,6$ J/kg ; $p = 0,001$).

Lors de l'étude de Firminger *et al.* (33), les auteurs ont mesuré la charge cumulée et le travail excentrique/concentrique au niveau des articulations. La charge cumulée a été calculée en multipliant l'impulsion angulaire de l'articulation par le nombre de phases d'appui pour courir cinq kilomètres. Le travail excentrique (puissance articulaire négative) et concentrique (puissance articulaire positive) ont été calculés grâce à la courbe de puissance articulaire de l'articulation. Les résultats ont montré que la course en chaussures minimalistes avec une longueur de pas préférentielle, apportait une augmentation significative de la charge cumulée et du travail excentrique au niveau de la cheville (7,3% et 20,7% respectivement ; $p \leq 0,001$). Le travail concentrique n'était pas affecté par le type de chaussage. Cependant la foulée à 90% de la longueur préférentielle a montré une diminution du travail concentrique de -11,7% ($p \leq 0,037$) et une augmentation de la charge cumulée de 6,5% ($p = 0,007$).

L'étude de Sinclair (30) a montré une augmentation des contraintes au niveau du tendon d'Achille lorsque les coureurs étaient pieds-nus ou chaussés de chaussures minimalistes ($p < 0,006$) (ANNEXE IV).

L'étude de Hashish *et al.* de 2018 (35) a montré qu'après une transition de huit à dix semaines vers une course pieds-nus, les coureurs qui étaient dans les groupes FFS et MFS lors des premiers tests ont subis une réduction significative de l'absorption d'énergie au niveau de la cheville ($-3,8 \pm 1,3$ J/kg ; $p = 0,034$ et $-1,9 \pm 2,2$ J/kg ; $p = 0,044$ respectivement). Lors de cette étude, les auteurs ont aussi étudié la production d'énergie au niveau des articulations avec la puissance articulaire positive de l'articulation lors de toute la phase d'appui. Celle-ci a montré une réduction significative pour toutes les foulées après la transition (FFS : $-5,6 \pm 1,4$ J/kg ; $p = 0,021$ | MFS : $-3,8 \pm 1,7$ J/kg ; $p < 0,001$ | RFS : $-2,2 \pm 2,1$ J/kg ; $p = 0,034$).

4.2.2.3. Au niveau du genou

L'étude de Sinclair (30) avait pour but d'analyser les forces de contact (PTF) et de pression fémoro-patellaire (PP) au niveau du genou. La PTF était calculée en fonction de la force du quadriceps qui elle-même était estimée en fonction du moment d'extension du genou. La PP, était estimée en divisant la PTF par la surface de contact fémoro-patellaire. Les résultats ont montré que les forces de contact fémoro-patellaire étaient plus importantes lors d'une course avec des chaussures conventionnelles, comparé à une course en chaussures minimalistes ou pieds-nus ($p < 0,006$). Il a aussi été démontré que courir avec des chaussures conventionnelles augmentait les forces de pression fémoro-patellaires ($p < 0,006$) (ANNEXE IV).

L'étude de Hashish *et al.* de 2016 (34) a montré que lors d'une course pieds-nus, les participants de tous les groupes (RFS, MFS et FFS) diminuaient significativement l'absorption énergétique au niveau de l'articulation du genou. Les RFS l'ont diminué de 25% ($2,9 \pm 2,1$ J/kg ; $p = 0,011$), les MFS de 51% ($5,1 \pm 2,0$ J/kg ; $p < 0,001$) et les FFS de 39% ($3,4 \pm 0,7$ J/kg ; $p = 0,002$).

L'étude de Hashish *et al.* de 2018 (35) a montré qu'après une transition de huit à dix semaines, les coureurs RFS présentaient une augmentation significative de l'absorption énergétique au niveau du genou par rapport aux participants FFS (44% ; $p = 0,021$) et MFS (40% ; $p = 0,005$).

Lors de l'étude de Firminger *et al.* (33), les résultats ont montré une diminution de la charge cumulée au niveau de l'articulation du genou lors d'une course en chaussures minimalistes à la longueur de foulée préférentielle (-7,9% ; $p \leq 0,021$). Cependant, les forces musculaires concentrique et excentrique ne sont pas affectées par le type de chaussage. Lors de la course minimaliste à 90% de la longueur préférentielle, il y a une diminution significative de la charge cumulée, du travail concentrique et du travail excentrique (-11,8%, -16,9%, -20,5% respectivement ; $p \leq 0,037$).

4.2.2.4. Au niveau du pied

L'étude de Firminger *et al.* (33) a montré que lors d'une course en chaussures minimalistes, le travail excentrique au niveau de l'articulation métatarso-phalangienne était augmentée de 23,1% ($p = 0,002$) et que le travail concentrique était diminué de 16,9% ($p = 0,007$). Lors de la course à 90% de la longueur de foulée préférentielle, la charge cumulée s'est trouvée significativement augmentée de 12,4% ($p = 0,025$) alors que les autres variables sont restées inchangées.

L'étude de Bergstra *et al.* (29) avait pour but d'analyser le pic de pression plantaire et la pression moyenne maximale lors du port de chaussures minimaliste, à l'aide de semelles dotées de capteurs de pression. Les résultats ont montré une augmentation du pic de pression de 13,0%, 37,3% et 37,9% au niveau de l'avant-pied médial, central et latéral respectivement. La pression moyenne maximale a elle aussi été augmentée (7,5%, 29,2% et 20,4% pour l'avant-pied médial, central et latéral respectivement). Pour le médio-pied, il y a eu une diminution significative du pic de pression et de la pression moyenne maximale (14,9% et 11,1% respectivement). Concernant la région de l'hallux et celle des orteils deux à cinq, les pressions moyennes maximales étaient diminuées de 8,55% et de 16,0% respectivement). Pour la région du talon, ces valeurs n'ont pas de différences significatives.

4.2.3. L'activité électromyographique

L'étude de Fleming *et al.* (32) analysait l'activité électromyographique (EMG) des muscles de membres inférieurs lors de la course chaussée et pieds-nus à trois vitesses différentes ($V1=3,13$ m/s ; $V2=3,80$ m/s ; $V3=4,47$ m/s). Les données EMG enregistrées étaient normalisées et exprimées en pourcentage de l'activité EMG maximale détectée lors de la phase d'appui sur les six essais effectués. Il en est ressorti que lors d'une course pieds-nus, l'activité EMG du tibial antérieur (TA) était significativement diminuée pendant de la phase de pré-activation (quinze derniers pourcents du cycle total), avant l'impact initial ($p < 0,05$). Cette différence est significative pour les vitesses $V1$ ($8 \pm 4\%$ pieds-nus et $12 \pm 10\%$ chaussé) et $V2$ ($11 \pm 6\%$ pieds-nus et $15 \pm 12\%$ pieds-nus) seulement. Concernant les gastrocnémiens médiaux (GM) et latéraux (GL), la phase de pré-activation montrait une activité EMG significativement supérieure en étant pieds-nus ($p < 0,01$ et $p < 0,05$

respectivement). La pré-activation du GM lors de la course pieds-nus était supérieure à V1 ($19 \pm 12\%$ vs. $12 \pm 8\%$; $p < 0,05$) et V3 ($22 \pm 11\%$ vs. $16 \pm 6\%$; $p < 0,05$). Cependant il n'y avait pas de différence significative pour V2 ($21 \pm 10\%$ vs. $17 \pm 10\%$; $p = 0,16$). La pré-activation du GL lors de la course pieds-nus était significativement supérieure par rapport à la course chaussée, ceci quelle que soit la vitesse (V1 = $10 \pm 7\%$ vs. $6 \pm 3\%$; $p < 0,05$ | V2 = $12 \pm 6\%$ vs. $8 \pm 3\%$; $p < 0,05$ | V3 = $17 \pm 10\%$ vs. $11 \pm 5\%$; $p < 0,01$). Il n'y a pas de différence significative pour ces muscles lors de la phase d'absorption et de propulsion. Les activités électromyographiques des muscles GM, GL et TA lors de la phase de pré-activation sont illustrées en ANNEXE V.

4.2.4. La fréquence et la longueur de pas

Samaan *et al.* (28) ont montré que pieds-nus, les coureurs augmentaient en moyenne leur cadence de dix pas par minute, soit une augmentation de 6%. Cette augmentation de la cadence était accompagnée par une diminution de 5,5% de la longueur des pas.

L'étude de Fleming *et al.* (32) a montré que la course pieds-nus augmentait significativement la cadence (V1 = 87 ± 5 pas/min pieds-nus vs. 85 ± 5 pas/min chaussé ; $p < 0,001$ | V2 = 91 ± 5 pas/min vs. 88 ± 6 pas/min ; $p < 0,001$ | V3 = 96 ± 6 pas/min vs. 92 ± 6 pas/min ; $p < 0,001$) et diminuait significativement la longueur de pas ($p < 0,001$) pour toutes les vitesses étudiées.

5. DISCUSSION

Le but de cette revue de littérature était de déterminer les effets d'une transition de chaussures maximalistes à des chaussures minimalistes ou pieds-nus sur la cinématique et la cinétique des membres inférieurs chez le coureur confirmé. Ensuite, de pouvoir déterminer les variables sur lesquelles le masseur-kinésithérapeute pourrait jouer un rôle afin d'accompagner le sportif dans cette transition ou lors d'une blessure.

5.1. Résultats

Les résultats obtenus montrent que :

Toutes les études s'accordent à dire qu'au niveau de la cinématique de cheville, la course pieds-nus ou en chaussures minimalistes avec ou sans instructions, augmente significativement la flexion plantaire de cheville (28)(29)(33)(30)(31)(32)(34)(35)(37).

Cependant, cette augmentation ne permet pas à tous les coureurs d'adopter une pose de pieds en FFS. L'étude de Samaan *et al.* (28) étudiant les effets d'une course pieds-nus avec instruction, a montré le taux le plus important de coureurs FFS lors de ce type de course (92%). Alors que les autres études, ne donnant pas d'indications lors de la course pieds-nus ont montré un taux de coureurs FFS post-transition allant de 0 à 66% (30)(31)(32)(33)(34)(35)(37). Donner des indications concernant la foulée lors d'une course pieds-nus ou en chaussures minimalistes semble essentiel afin que les coureurs adoptent une pose de pieds en FFS.

De ce fait, les coureurs étant restés en RFS lors de la course pieds-nus ou en chaussures minimalistes ont vu leurs forces de réaction du sol augmenter considérablement, contrairement aux coureurs étant passés en FFS. L'étude de Hashish *et al.* de 2018 (35) a enregistré une augmentation du taux de chargement lors de la course pieds-nus chez les coureurs RFS jusqu'à 166%. Il est à noter que dans cette étude, aucun participant n'avait adopté une foulée FFS. De même, celle de Tam *et al.* (37) a montré qu'en courant pieds-nus, ces mêmes taux de chargement s'étendaient de 12,3 à 622,8 BW/s. Alors que chaussé, ils allaient de 27,2 à 315,3 BW/s. Le port de chaussures chez les coureurs RFS pieds-nus avec des taux élevés permettait une diminution de ces valeurs. L'étude de Hashish *et al.* de 2016 (34) a enregistré une augmentation des taux de chargement de 108% chez les coureurs étant restés en RFS pieds-nus.

À contrario, les coureurs ayant réussi à adopter une foulée FFS ont montré une diminution significative de ces valeurs. Concernant l'étude de Tam *et al.* (37), on peut s'apercevoir que même si ces taux étaient parfois deux fois supérieurs en étant pieds-nus, ils étaient aussi deux fois inférieurs chez certains coureurs ayant adopté une foulée FFS.

L'étude de Hashish *et al.* de 2016 (34) a montré que pieds-nus, les coureurs en FFS diminuaient leurs taux de chargement de 41%. Lors de l'étude de Samaan *et al.* (28) ayant montré le meilleur taux de coureurs FFS pendant une course pieds-nus, ces derniers ont réussi à diminuer leurs VALR et VILR de 57 et 51% respectivement. Ces valeurs sont expliquées par la disparition du pic d'impact lors d'une foulée FFS. Cheng *et al.* (31) aussi ont pu observer que les coureurs pieds-nus en FFS avaient un VALR diminué par rapport aux coureurs restés en RFS. Cependant, deux participants en FFS avaient augmenté cette variable. Ils expliquent cela par une mauvaise compliance articulaire due au changement peut être trop brutal du type de course.

Au niveau de la cheville, la cinétique varie aussi en fonction des conditions de course. L'étude de 2016 de Hashish *et al.* (34) a mis en avant le fait que les coureurs FFS lors de la course pieds-nus ont augmenté leurs forces d'absorption énergétique de cheville de 140% contrairement aux coureurs étant restés en RFS qui n'ont eu aucun changement. Firminger *et al.* (33) ont trouvé que la course en chaussures minimalistes augmentait de 20,7% le travail excentrique au niveau de cette même articulation. La seule étude n'ayant pas de résultats similaires est celle de Hashish *et al.* de 2018 (35). En effet, ils observent qu'après une transition de huit à dix semaines, l'absorption énergétique au niveau de la cheville est diminuée pour les coureurs FFS et MFS. Ces résultats s'expliquent par le fait que les coureurs, d'abord identifiés comme FFS ou MFS lors de la première visite, sont retournés soit en MFS ou en RFS après la transition.

Cette augmentation de contraintes au niveau de la cheville s'explique par la variation de l'activité électromyographique suivant les conditions de course. L'étude de Fleming *et al.* (29) a observé d'une part, que l'activité du muscle tibial antérieur était diminuée lors de la phase de pré-activation. D'autre part, que l'activité des muscles gastrocnémiens était significativement augmentée. Cette pré-activation des muscles postérieurs de la jambe est due aux changements cinématiques du membre inférieur et explique l'augmentation des contraintes au niveau de la cheville lors d'une course pieds-nus. L'activation précoce de ces muscles avant le contact au sol permet une meilleure absorption énergétique musculaire et donc une augmentation du travail excentrique au niveau de cette articulation lors d'une foulée FFS.

Les études ayant analysé les données cinématiques au niveau du genou ont montré des résultats concordants. La course pieds-nus ou en chaussures minimalistes provoquait une augmentation de la flexion de genou lors du contact initial pour Fleming *et al.* (29), Firminger *et al.* (33) et Tam *et al.* (37), une diminution de l'amplitude articulaire lors de la phase d'appui pour Fleming *et al.* (32) et Firminger *et al.* (33) et une diminution du moment d'extension du genou pour Sinclair (30).

La cinétique de genou lors de la course pieds-nus ou en chaussures minimalistes s'est aussi vue modifiée. Sinclair (30) a montré que les forces de contact et de pression fémoro-patellaires étaient diminuées lors du port de chaussures minimalistes. L'étude de Hashish *et al.* de 2016 (34) a observé une diminution significative de l'absorption énergétique au niveau de cette articulation chez tous les coureurs (RFS, MFS et FFS). Cette diminution était tout de même plus importante chez les coureurs FFS. Cependant, l'étude de Hashish *et al.* (35) de 2018 montre le contraire chez des coureurs ayant terminé une transition de huit à dix semaines. Cette augmentation de contraintes au niveau du genou s'explique par le fait que les participants sont retournés à une course en MFS ou en RFS comme expliqué ci-dessus. L'étude de Firminger *et al.* (33) a observé que la course pieds-nus à la longueur préférentielle diminuait seulement la charge cumulée au niveau de cette articulation et n'avait pas d'effets sur le travail excentrique ou concentrique.

Il est à noter que la course pieds-nus ou minimaliste est caractérisée par une diminution de la longueur de pas et une augmentation de la cadence comme le montrent Samaan *et al.* (28) et Fleming *et al.* (32). Le fait que la course minimaliste n'affecte pas ces valeurs avec une longueur de pas préférentielle est normal. Si le coureur ne diminue pas sa longueur de foulée, il ne pourra pas augmenter sa flexion de genou au contact initial. Cette flexion permet un rapprochement du membre inférieur par rapport au centre de masse et donc une diminution du bras de levier du quadriceps. Un bras de levier moins important demande un travail musculaire moindre. Les essais lors d'une foulée à 90% de la foulée préférentielle confirment cette hypothèse en montrant une diminution significative du travail concentrique et excentrique lors de cette même étude de Firminger *et al.* (33). Cette diminution de travail musculaire par la réduction de la longueur de pas explique aussi la diminution des contraintes fémoro-patellaires lors de la course minimaliste.

Au niveau du pied, Bergstra *et al.* (29) ainsi que Firminger *et al.* (33) ont observé une augmentation des contraintes au niveau du pied et plus particulièrement au niveau des articulations métatarso-phalangiennes et au niveau de la tête des métatarses. Cela n'est pas surprenant chez des coureurs FFS qui posent d'abord la pointe du pied au sol lors du contact initial.

Ces résultats montrent que la pose du pied a une importance considérable lors de la course pieds-nus ou en chaussures minimalistes. Cependant, nous observons une grande hétérogénéité de type de pose de pieds lors des différentes conditions de chaussage sans instructions. De ce fait, les coureurs novices dans ce type de course n'ayant pas une pose de pieds en FFS ne montrent pas de diminution des taux de chargement. Au contraire, ces taux se voient augmentés. Cela s'explique peut-être par le fait que les participants étaient des coureurs confirmés et avaient déjà adoptés une foulée qui leur était propre. Le fait de leur donner des instructions par rapport à leurs foulées leur a permis d'adopter une pose de pieds en FFS et de diminuer drastiquement leurs forces d'impact.

L'augmentation du travail excentrique au niveau de la cheville chez les coureurs FFS est normale en observant leur cinématique. En effet, avoir un contact avec le sol par la pointe du pied au lieu du talon, demande une absorption énergétique beaucoup plus importante au niveau des muscles fléchisseurs plantaire, pour permettre un amortissement musculaire le plus efficace (38).

La longueur de pas et la cadence ont une influence importante au niveau de l'articulation du genou. En effet sans raccourcir sa longueur de foulée, le coureur ne parvient pas à avoir une flexion de genou suffisante afin de diminuer les contraintes au niveau de cette articulation (16).

5.2. Liens avec la kinésithérapie

5.2.1. Chez un sportif effectuant la transition

Nous avons vu que 75,7% des coureurs souhaiteraient passer à une course minimaliste ou pieds-nus si cela pouvait leur permettre de moins se blesser (27). Nous avons aussi observé la grande hétérogénéité de cinématiques des membres inférieurs lors de ce type de course, mais aussi les effets négatifs sur la cinétique que provoque une pose de pieds en RFS lors du contact initial.

Ces contraintes au niveau des membres inférieurs sont considérées comme des facteurs de risques concernant l'apparition des blessures liées à la course à pied. Des forces de réaction du sol importantes sont fortement corrélées à l'apparition de fractures de fatigues tibiales et d'aponévrosites plantaires (39)(40). De même, une augmentation des contraintes au niveau du genou joue un rôle dans l'apparition de blessures liées à la pratique de la course à pied (21)(22).

Dans ce cas, le kinésithérapeute peut analyser visuellement la foulée du sportif lors du port de ses nouvelles chaussures, ou pieds-nus. Si le patient a une pose de pieds en RFS ou une trop grande extension de genou, il peut lui donner des instructions simples. Celles-ci peuvent être « courir le plus légèrement possible », « réduire la longueur des pas » et « augmenter la cadence de course », cela afin d'ajuster sa foulée, d'éviter ces augmentations de contraintes et de prévenir l'apparition de blessures liées à la transition (28).

Le masseur-kinésithérapeute doit pouvoir donner des exercices de préparation physique au sportif. Effectivement, nous avons vu que le changement de pose de pieds en une pose FFS augmentait considérablement les contraintes au niveau des muscles postérieurs de la jambe ainsi qu'au niveau de la cheville et du pied. Des forces trop grandes et un volume de travail trop important sur un muscle non préparé ont été démontrés comme facteurs de risque d'apparition de lésions myo-aponévrotiques (41). De plus, des muscles du pied trop faibles seraient un facteur de risque d'apparition d'aponévrosite plantaire (42)(43). Selon une étude, 86% des coureurs participant à une transition de trente semaines en

chaussures minimalistes se sont blessés et ont reporté des douleurs au niveau des muscles postérieurs de la jambe et au niveau des métatarses (44).

Il est donc important de pouvoir prodiguer au patient des exercices raisonnés afin de préparer ces structures en sécurité, en vue de la transition. Ces exercices peuvent se décliner en un renforcement des muscles extrinsèques du pied en poids de corps en faisant des pointes de pieds, mais aussi en travaillant la proprioception sur des surfaces instables, ou encore en effectuant des exercices pliométriques comme des « jump squats » (réaliser un squat donnant une impulsion sur le temps de redressement afin de sauter), des exercices en faisant des bonds en pointe de pied (vers l'avant, latéralement, en unipodal), ou encore des sauts depuis un banc surélevé en essayant de faire le moins de bruit possible en atterrissant sur la pointe des pieds (45)(46).

Un travail des muscles intrinsèques est aussi à prendre en compte. Par exemple en crochétant une serviette avec les orteils, en les écartant les uns des autres, ou lors des exercices de proprioception (45)(47). Le fait même de marcher avec des chaussures minimalistes permet, en plus de se familiariser avec, un renforcement de ces muscles. En plus de prévenir l'apparition d'aponévrosite, des muscles intrinsèques robustes diminueraient les forces de flexion au niveau des métatarsiens et donc le risque de fractures de fatigue de ceux-ci (48).

Les exercices présentés ne sont pas exhaustifs et sont libres de l'imagination de chaque thérapeute.

Il sera important de pouvoir proposer des exercices d'assouplissement de la cheville et du pied, des étirements musculaires à effectuer à distance des entraînements, ceux-ci ayant pour but d'avoir une bonne amplitude et compliance articulaire lors de la course (45)(46).

L'élaboration d'un protocole de transition pour le patient est aussi judicieux afin d'éviter tout risque de survenue de blessures de surmenage, en commençant par exemple à courir sur des surfaces plutôt molles comme sur de l'herbe. Puis de suivre la règle du 10% de course minimaliste ou pieds-nus en plus par semaine. Dans ce cas, le coureur passerait 10% de ses sorties la première semaine à courir en chaussures minimalistes jusqu'à 100% de sa sortie lors de la dernière semaine (45)(46).

L'éducation du patient concernant son ressenti sera primordial afin qu'il ne force pas sur ses entraînements et sache se mettre au repos au lieu de continuer à courir et se blesser.

5.2.2. Chez le patient blessé

Cette revue de littérature nous a permis de mieux comprendre les mécanismes de la course à pied et l'influence du chaussage sur la biomécanique des membres inférieurs chez le coureur confirmé. Cette compréhension semble indispensable afin de pouvoir identifier les facteurs de risque de blessures liées à cette pratique sportive.

Ayant ces cartes en main, le masseur-kinésithérapeute peut, en parallèle des séances de rééducation, conseiller le patient sur sa façon de courir. Après une analyse ne serait-ce que visuelle de la cinématique de course (en évaluant la flexion de cheville, de genou, ou la longueur des pas), le thérapeute pourrait être en mesure d'identifier si le problème vient principalement de la technique de course du patient ou non. Si le problème vient effectivement du schéma de course du patient, différentes instructions peuvent être données en fonction de la partie anatomique lésée.

Dans le cas de douleurs de genou tel qu'un syndrome fémoro-patellaire, une tendinopathie du tendon quadricipital ou sous-patellaire, une réduction de la longueur de pas et une augmentation de la cadence peuvent être proposées au patient. Nous avons effectivement vu les effets d'une réduction de longueur de foulée sur les amplitudes articulaires et sur le travail des muscles du genou en diminuant le travail excentrique et concentrique au niveau de cette même articulation.

Dans le cadre d'une périostite tibiale ou d'une tendinite du muscle tibial antérieur par exemple, le masseur-kinésithérapeute pourrait demander au patient d'adopter une foulée plus en FFS. Effectivement, avoir une pose de pieds plus en flexion plantaire diminue significativement les contraintes au niveau de la loge antérieure de la jambe. Cette foulée pourrait permettre de diminuer les sollicitations sur les structures touchées lors de pathologies comme celles-ci.

Cependant, en proposant ces alternatives de course, le masseur-kinésithérapeute doit garder en tête qu'elles vont certes diminuer les contraintes au niveau de certaines zones, mais vont venir en solliciter d'autres, comme le mollet et l'avant-pied lors d'une course FFS.

Effectivement, comme nous avons pu le constater dans l'étude de Hashish *et al.* (35), certains participants en FFS ont éprouvé des douleurs au niveau des mollets. Cela n'est pas surprenant en observant l'augmentation des contraintes au niveau de la cheville et de la partie postérieure de la jambe avec une pose de pieds en FFS. Il est donc judicieux, tout comme chez le sportif effectuant la transition, de prodiguer des exercices de renforcement, pliométriques ou d'assouplissement.

Suivant l'exemple du coureur effectuant la transition, le kinésithérapeute devra établir un protocole de transition pour le patient. Le but n'étant pas de proposer au patient de passer à des chaussures minimalistes, mais de s'inspirer de ces protocoles pour pouvoir le guider en fonction des conseils que le kinésithérapeute lui aura donné concernant sa foulée, cela afin d'éviter les surmenages (45)(46).

Concernant le choix des chaussures, le kinésithérapeute peut donner son avis au patient. Cependant, notre décret de compétences ne nous permet pas d'être des professionnels dans ce domaine. Il est donc dans notre rôle de pouvoir l'orienter chez des spécialistes qui pourront lui fournir des chaussures adaptées.

5.3. Perspectives

Les études sélectionnées ont étudié les effets d'une transition en course minimaliste ou pieds-nus de façon aiguë et sans instructions. De plus, aucun exercice de renforcement ou de préparation physique n'a été prodigué aux participants. Les prochaines études devraient étudier ces mêmes données lors d'une transition complète, avec des instructions et des protocoles de préparation physique adaptés. Cela permettra d'avoir des protocoles d'exercices validés afin de pouvoir effectuer ce type de transition en toute sécurité.

5.4. Limites

Les bases de données interrogées ont été au nombre de quatre, faisant ressortir neuf articles correspondant aux critères d'inclusions que nous nous sommes fixés. Il est possible que certains articles soient passés au travers de notre analyse en interrogeant seulement ces bases.

La plupart des études sélectionnées étudiaient la cinématique et la cinétique des membres inférieurs lors d'une transition dite « aiguë » et sans instructions. Effectivement, les participants n'avaient aucune expérience en course pieds-nus ou minimaliste et devaient courir dans ces conditions sans indications sur la foulée à adopter. Cette population ne reflète donc pas forcément tous les coureurs effectuant cette transition. Cependant elle convient parfaitement aux personnes voulant passer à ce type de course sans avoir eu de conseils particuliers.

Les mesures des études ont été prises sur des pistes de quelques mètres, ou sur tapis roulant et ne reflètent donc pas exactement les conditions réelles de course.

Les valeurs cinématiques retenues ont été celles dans le plan sagittal car étant des mouvements majeurs. Les données dans le plan frontal et horizontal n'ont pas été étudiées et peuvent jouer un rôle dans la répartition des contraintes.

Les résultats des études ne traitent pas directement des blessures liées à la course à pieds. Ils ont été comparés à la littérature concernant les facteurs de risque de blessures liée à cette pratique sportive. Pour qu'ensuite nous établissions le rôle que pourrait jouer le kinésithérapeute dans ce domaine.

6. CONCLUSION

Cette revue de littérature montre que la course pieds-nus ou en chaussures minimalistes influe sur la cinématique des membres inférieurs. La modification de ces variables cinématiques a un impact sur les forces renvoyées par le sol et sur les contraintes subies par les différentes articulations et muscles.

Cependant, lors de la transition sans instructions à ce type de course, nous observons une hétérogénéité de la cinématique des membres inférieurs chez les coureurs. Ces derniers, restants en RFS lors d'une course minimaliste ou pieds-nus, voient leurs valeurs cinétiques de genou et de réactions du sol augmenter considérablement. Contrairement à eux, les coureurs ayant une pose de pieds en FFS lors de ce type de course montre une diminution de ces valeurs. D'un autre côté, les coureurs FFS ont montré une augmentation des contraintes au niveau de la cheville et du pied, ainsi que des muscles postérieurs de la jambe.

Des instructions et des exercices de renforcement semblent indispensables afin que les sportifs adoptent une foulée adéquate lors de ces conditions de course.

Le masseur-kinésithérapeute peut donc donner des instructions simples chez ce type de sportif effectuant une transition afin qu'ils puissent adopter une cinématique correcte, dans le but de limiter l'augmentation des contraintes de réaction du sol et au niveau du genou. Il peut aussi proposer des exercices raisonnés pour prévenir les blessures liées à cette transition.

Chez le patient blessé, le thérapeute peut prodiguer des conseils concernant sa cinématique de course en fonction de la zone anatomique touchée, afin réduire les contraintes au niveau de celle-ci et de prévenir la récurrence des pathologies liées à la course à pied.

Le but de ce mémoire était non pas de pousser les patients blessés ou non à adopter une course minimaliste ou pieds-nus. Au contraire, il nous a permis de comprendre les mécanismes de la course à pied concernant la cinématique et la cinétique des membres inférieurs en fonction des conditions de chaussage. De cette analyse, nous avons pu identifier les bienfaits et les risques d'une transition à une course minimaliste ou pieds-nus et ainsi établir les points sur lesquels le masseur-kinésithérapeute peut intervenir pour prévenir l'apparition de blessures liées à cette transition chez les sportifs l'effectuant.

Aussi, nous avons pu extraire les données nécessaires afin de pouvoir adapter notre prise en charge chez un patient atteint d'une blessure liée à la course à pied. Nous avons pu identifier les paramètres sur lesquels le masseur-kinésithérapeute peut influencer afin de prévenir la récurrence de blessures liés à la course et d'accompagner correctement le patient lors de son parcours de soin.

BIBLIOGRAPHIE

1. Pontzer H. Economy and Endurance in Human Evolution. *Current Biology*. 2017 Jun;27(12):613–621.
2. Fédération Française d’Athlétisme, Sportlab. Enquête : La course à pied à l’étude [Internet]. 2013 [consulté le 2 Mars 2019]. Disponible sur: <http://www.athle.fr/asp.net/main.news/news.aspx?newsid=11782>
3. Lee D, Brellenthin AG, Thompson PD, Sui X, Lee I-M, Lavie CJ. Running as a Key Lifestyle Medicine for Longevity. *Progress in Cardiovascular Diseases*. 2017 Jul;60(1):45–55.
4. Kluitenberg B, van Middelkoop M, Diercks R, van der Worp H. What are the Differences in Injury Proportions Between Different Populations of Runners? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med*. 2015;45(8):1143–61.
5. Yamato TP, Saragiotto BT, Hespanhol Junior LC, Yeung SS, Lopes AD. Descriptors used to define running-related musculoskeletal injury: a systematic review. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2015 May;45(5):366–74.
6. Francis P, Whatman C, Sheerin K, Hume P, Johnson MI. The Proportion of Lower Limb Running Injuries by Gender, Anatomical Location and Specific Pathology: A Systematic Review. *J Sports Sci Med*. 2019 Feb 11;18(1):21–31.
7. Kemler E, Blokland D, Backx F, Huisstede B. Differences in injury risk and characteristics of injuries between novice and experienced runners over a 4-year period. *The Physician and Sportsmedicine*. 2018 Oct 2;46(4):485–91.
8. Theisen D, Malisoux L, Gette P, Nührenbörger C, Urhausen A. Footwear and running-related injuries – Running on faith? *Sports Orthopaedics and Traumatology Sport-Orthopädie - Sport-Traumatologie*. 2016 Jun;32(2):169–76.
9. Davis IS, Rice HM, Wearing SC. Why forefoot striking in minimal shoes might positively change the course of running injuries. *Journal of Sport and Health Science*. 2017 Jun 1;6(2):154–61.
10. Pollard CD, Ter Har JA, Hannigan JJ, Norcross MF. Influence of Maximal Running Shoes on Biomechanics Before and After a 5K Run. *Orthop J Sports Med*. 2018 Jun;6(6):2325967118775720.
11. Kulmala J-P, Kosonen J, Nurminen J, Avela J. Running in highly cushioned shoes increases leg stiffness and amplifies impact loading. *Sci Rep* [Internet]. 2018 Nov 30;8. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6269547/>
12. Zadpoor AA, Nikooyan AA. The relationship between lower-extremity stress fractures and the ground reaction force: A systematic review. *Clinical Biomechanics*. 2011 Jan;26(1):23–8.

13. Lieberman DE, Venkadesan M, Werbel WA, Daoud AI, D'Andrea S, Davis IS, et al. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature*. 2010 Jan;463(7280):531–5.
14. Hasegawa H, Yamauchi T, Kraemer WJ. Foot strike patterns of runners at the 15-km point during an elite-level half marathon. *J Strength Cond Res*. 2007 Aug;21(3):888–93.
15. Davis IS. The re-emergence of the minimal running shoe. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2014 Oct;44(10):775–84.
16. Heiderscheit BC, Chumanov ES, Michalski MP, Wille CM, Ryan MB. Effects of step rate manipulation on joint mechanics during running. *Med Sci Sports Exerc*. 2011 Feb;43(2):296–302.
17. F. Leboeuf, F. Achard de Leluardière, P. Lacouture, J. Duboy, F. Leplanquais, A. Junqua. Étude Biomécanique de La Course à Pied [Internet]. 2006 [consulté le 9 Mars 2019]. Disponible sur : <https://www.scribd.com/document/6566878/Biomeca-Pied>
18. Mercer JA, Horsch S. Heel-toe running: A new look at the influence of foot strike pattern on impact force. *Journal of Exercise Science & Fitness*. 2015 Jun 1;13(1):29–34.
19. Almeida MO, Davis IS, Lopes AD. Biomechanical Differences of Foot-Strike Patterns During Running: A Systematic Review With Meta-analysis. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 2015 Oct;45(10):738–55.
20. Bonacci J, Hall M, Fox A, Saunders N, Shippersides T, Vicenzino B. The influence of cadence and shoes on patellofemoral joint kinetics in runners with patellofemoral pain. *J Sci Med Sport*. 2018 Jun;21(6):574–8.
21. Bonacci J, Vicenzino B, Spratford W, Collins P. Take your shoes off to reduce patellofemoral joint stress during running. *British Journal of Sports Medicine*. 2014 Mar;48(6):425–8.
22. Kulmala J-P, Avela J, Pasanen K, Parkkari J. Forefoot strikers exhibit lower running-induced knee loading than rearfoot strikers. *Med Sci Sports Exerc*. 2013 Dec;45(12):2306–13.
23. Yong JR, Silder A, Delp SL. Differences in muscle activity between natural forefoot and rearfoot strikers during running. *Journal of Biomechanics*. 2014 Nov;47(15):3593–7.
24. Ahn AN, Brayton C, Bhatia T, Martin P. Muscle activity and kinematics of forefoot and rearfoot strike runners. *Journal of Sport and Health Science*. 2014 Jun;3(2):102–12.
25. Altman AR, Davis IS. Barefoot Running: Biomechanics and Implications for Running Injuries. *Current Sports Medicine Reports*. 2012;11(5):244–50.
26. Li S, Zhang Y, Gu Y, Ren J. Stress distribution of metatarsals during forefoot strike versus rearfoot strike: A finite element study. *Computers in Biology and Medicine*. 2017 Dec 1;91:38–46.

27. Rothschild CE. Primitive running: a survey analysis of runners' interest, participation, and implementation. *J Strength Cond Res.* 2012 Aug;26(8):2021–6.
28. Samaan CD, Rainbow MJ, Davis IS. Reduction in ground reaction force variables with instructed barefoot running. *Journal of Sport and Health Science.* 2014 Jun 1;3(2):143–51.
29. Bergstra SA, Kluitenberg B, Dekker R, Bredeweg SW, Postema K, Van den Heuvel ER, et al. Running with a minimalist shoe increases plantar pressure in the forefoot region of healthy female runners. *Journal of Science and Medicine in Sport.* 2015 Jul 1;18(4):463–8.
30. Sinclair J. Effects of barefoot and barefoot inspired footwear on knee and ankle loading during running. *Clinical Biomechanics.* 2014 Apr 1;29(4):395–9.
31. Cheung RTH, Rainbow MJ. Landing pattern and vertical loading rates during first attempt of barefoot running in habitual shod runners. *Human Movement Science.* 2014 Apr 1;34:120–7.
32. Fleming N, Walters J, Grounds J, Fife L, Finch A. Acute response to barefoot running in habitually shod males. *Hum Mov Sci.* 2015 Aug;42:27–37.
33. Firminger CR, Edwards WB. The influence of minimalist footwear and stride length reduction on lower-extremity running mechanics and cumulative loading. *Journal of Science and Medicine in Sport.* 2016 Dec 1;19(12):975–9.
34. Hashish R, Samarawickrame SD, Powers CM, Salem GJ. Lower limb dynamics vary in shod runners who acutely transition to barefoot running. *Journal of Biomechanics.* 2016 Jan 25;49(2):284–8.
35. Hashish R, Samarawickrame SD, Sigward S, Azen SP, Salem GJ. Lower-limb dynamics and clinical outcomes for habitually shod runners who transition to barefoot running. *Physical Therapy in Sport.* 2018 Jan 1;29:93–100.
36. Tam N, Prins D, Divekar NV, Lamberts RP. Biomechanical analysis of gait waveform data: exploring differences between shod and barefoot running in habitually shod runners. *Gait & Posture.* 2017 Oct 1;58:274–9.
37. Tam N, Astephen Wilson JL, Coetzee DR, van Pletzen L, Tucker R. Loading rate increases during barefoot running in habitually shod runners: Individual responses to an unfamiliar condition. *Gait & Posture.* 2016 May 1;46:47–52.
38. Rice H, Patel M. Manipulation of Foot Strike and Footwear Increases Achilles Tendon Loading During Running. *Am J Sports Med.* 2017 Aug;45(10):2411–7.
39. van der Worp H, Vrieling JW, Bredeweg SW. Do runners who suffer injuries have higher vertical ground reaction forces than those who remain injury-free? A systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med.* 2016 Apr;50(8):450–7.

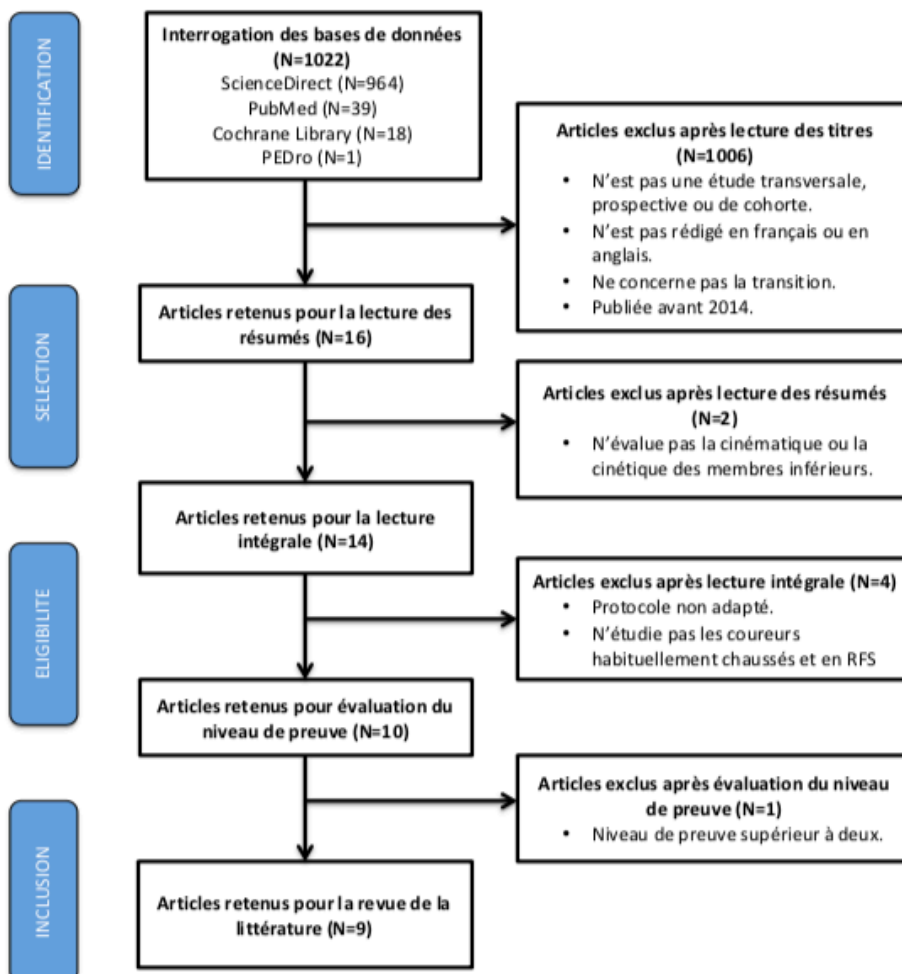
40. Davis IS, Bowser BJ, Mullineaux DR. Greater vertical impact loading in female runners with medically diagnosed injuries: a prospective investigation. *Br J Sports Med*. 2016 Jul;50(14):887–92.
41. Milgrom C, Radeva-Petrova DR, Finestone A, Nyska M, Mendelson S, Benjuya N, et al. The effect of muscle fatigue on in vivo tibial strains. *J Biomech*. 2007;40(4):845–50.
42. Cheung RTH, Sze LKY, Mok NW, Ng GYF. Intrinsic foot muscle volume in experienced runners with and without chronic plantar fasciitis. *J Sci Med Sport*. 2016 Sep;19(9):713–5.
43. Barnes A, Sullivan J, Pappas E, Adams R, Burns J. Clinical and Functional Characteristics of People With Chronic and Recent-Onset Plantar Heel Pain. *PM R*. 2017 Nov;9(11):1128–34.
44. Salzler MJ, Kirwan HJ, Scarborough DM, Walker JT, Guarino AJ, Berkson EM. Injuries observed in a prospective transition from traditional to minimalist footwear: correlation of high impact transient forces and lower injury severity. *Phys Sportsmed*. 2016 Nov;44(4):373–9.
45. Rothschild C. Running Barefoot or in Minimalist Shoes: Evidence or Conjecture? *Strength & Conditioning Journal*. 2012 Apr;34(2):8.
46. Warne JP, Gruber AH. Transitioning to Minimal Footwear: a Systematic Review of Methods and Future Clinical Recommendations. *Sports Med*. 2017 Sep 15;3(1):33.
47. Hirayama K, Iwanuma S, Ikeda N, Yoshikawa A, Ema R, Kawakami Y. Plyometric Training Favors Optimizing Muscle-Tendon Behavior during Depth Jumping. *Front Physiol*. 2017;8:16.
48. Ridge ST, Olsen MT, Bruening DA, Jurgensmeier K, Griffin D, Davis IS, et al. Walking in Minimalist Shoes Is Effective for Strengthening Foot Muscles. *Med Sci Sports Exerc*. 2019 Jan;51(1):104–13.

ANNEXES

ANNEXE I : Grade des recommandations et niveau de preuve de la HAS

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).

ANNEXE II : Diagramme de flux des articles pour la revue de littérature.



ANNEXE III : Tableau des résultats de l'étude de Fleming *et al.*

Table 1

Group mean (SD) sagittal plane joint kinematic and spatiotemporal data. Asterisks infer significant difference between running conditions (**P* < .05; ***P* < .01; ****P* < .001). Plus signs infer significant difference to V1 (**P* < .05; ***P* < .01; ****P* < .001). Alpha signs infer significant difference to V2 (^α*P* < .05; ^{αα}*P* < .01; ^{ααα}*P* < .001).

	V1		V2		V3	
	BF	Shod	BF	Shod	BF	Shod
Ankle						
Angle at IC (°)	-4 (5)**	-1 (6)	-6 (4)**	-3 (5)	-5 (6)**	-2 (5)
Angle at TO (°)	-14 (5)*	-10 (7)	-18 (6)**	-15 (6)**	-19 (6)**	-15 (7)**
ROM (°)	23 (4)*	20 (5)	26 (4)**	22 (5)	26 (5)**	21 (4)*
Knee						
Angle at IC (°)	19 (5)*	17 (6)	21 (5)*	18 (6)	22 (5)**	19 (5)*
Angle at TO (°)	23 (4)	22 (2)	22 (4)	22 (7)	23 (3)	23 (7)
ROM (°)	23 (4)**	28 (3)	22 (3)**	28 (2)	23 (5)**	28 (2)
Time to peak (%)	38 (4)	41 (5)	36 (3)*	40 (6)	38 (3)*	41 (6)
Hip						
Angle at IC (°)	32 (4)	32 (7)	34 (4)**	34 (7)**	36 (6)**	37 (7)**
Angle at TO (°)	-2 (3)	-2 (6)	-5 (3)*	-5 (6)*	-7 (3)**	-5 (6)**
ROM (°)	2 (1)*	4 (1)	1 (1)*	3 (1)	1 (1)*	3 (1)
Spatiotemporal						
Stride freq. (stride min ⁻¹)	87 (5)**	85 (5)	91 (5)**	88 (6)*	96 (6)**	92 (6)**
Stride duration (ms)	689 (34)**	707 (38)	656 (34)**	688 (46)**	626 (33)**	651 (44)**
Absolute GCT (ms)	220 (19)	225 (19)	197 (15)**	206 (18)**	178 (18)**	188 (15)**
Normalised GCT (%)	32 (2)	32 (2)	30 (2)**	30 (2)**	28 (2)**	29 (2)**

ANNEXE IV : Tableau des résultats de l'étude de Sinclair.

Table 1

Mean & SD, joint kinetic information as a function of footwear.

	Barefoot		Vibram Five Fingers		Inov-8		Nike Free		Conventional	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Peak ME (kg·N·m)	2.58	0.70	2.74	0.75	2.69	0.82	2.89	0.75	3.15 AC	0.73 *
PTF (B·W)	3.19	1.04	3.43	1.28	3.56	1.29	4.02 ABC	1.25	4.11 ABC	1.19 *
Time to PTF (s)	0.08	0.01	0.08	0.01	0.08	0.01	0.08	0.01	0.08	0.01
PP (Mpa)	9.24	3.37	9.35	3.69	9.65	3.77	10.15 AB	3.28	10.28 AB	3.33 *
PTF load rate (B·W·s ⁻¹)	42.20	12.14	42.79	14.79	43.43	18.34	45.34	13.20	46.43 AB	13.52 *
Peak MPF (kg·N·m)	3.10	0.29	3.03	0.29	2.94	0.40	2.44 AC	0.55	2.52 AC	0.42 *
ATF (B·W)	6.17	0.66	5.80	0.64	5.91	0.85	4.84 AC	1.14	5.09 AC	0.87 *
Time to ATF (s)	0.13	0.01	0.14	0.01	0.13	0.02	0.14	0.02	0.14	0.01
ATF load rate (B·W·s ⁻¹)	41.38	6.49	39.03	7.03	40.79	9.46	35.53 A	11.44	37.26 A	7.27 *

Notes: * = significant main effect (*p* < 0.006).

^ = significantly different from barefoot, B = significantly different from Vibram Five Fingers, C = significantly different from Inov-8.

ANNEXE V : Activité électromyographique des muscles GM, GL et TA lors de l'étude de Fleming *et al.*

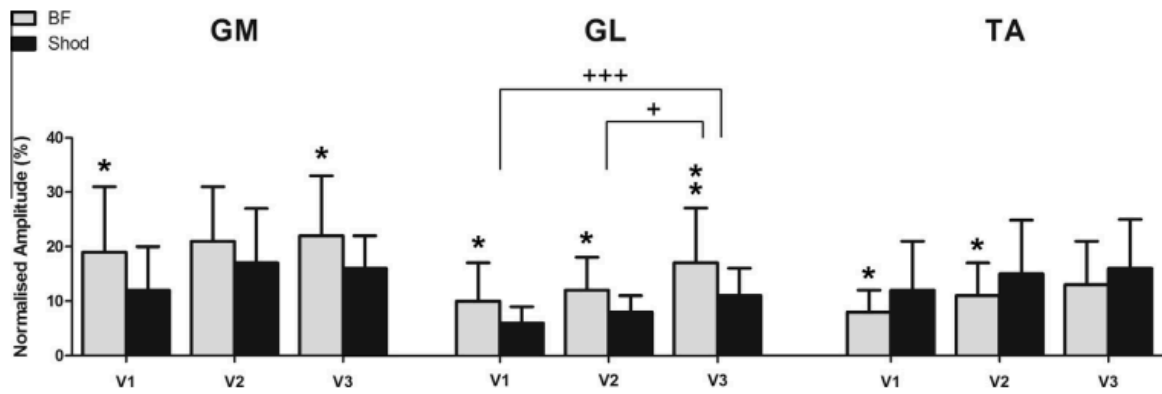


Fig. 3. Group mean (SD) EMG data for GM, GL and TA during the pre-activation phase of the stride cycle. Asterisks indicates significant difference between conditions (* $P < .05$; ** $P < .01$); plus signs indicate significant difference between velocities (* $P < .05$; *** $P < .001$).

ANNEXE VI : Exemple d'une fiche de lecture

Titre de l'article	Lower limb dynamics vary in shod runners who acutely transition to barefoot running.
Auteurs / revue / année / Vol / Pages	Rami Hashish, Sachithra D. Samarawickrame, Christopher M. Powers, George J. Salem. Journal of Biomechanics 2016 / volume 49 / pages 284-288.
INTRODUCTION	<p>Déterminer les caractéristiques biomécaniques des coureurs habitués à courir chaussés lors d'une rapide transition en course pieds-nus.</p> <p><u>Hypothèse :</u> Durant une course pieds-nus sans instructions, nous nous attendons à avoir plusieurs types de pose de pieds. Les coureurs qui restent en RFS en étant pieds-nus présenteront une augmentation du taux de chargement et de l'énergie absorbée au niveau du genou alors que les coureurs qui adoptent une foulée FFS ou MFS présenteront une diminution de ces variables.</p>
Type d'étude	Étude transversale interventionnelle.
Population	<p>22 coureurs (9 hommes et 13 femmes) 15 à 40 km par semaine. Age : 26,5 ± 3,7 ans Taille : 1,68 ± 0,12 m Poids : 64,1 ± 11,9 kg</p> <p>Critères d'inclusion : être coureur RFS, âgé de 19 à 40 ans, ne pas avoir eu d'expérience à la course pieds-nus ou minimaliste Critères d'exclusion : avoir eu une blessure durant les 6 derniers mois.</p> <p>Répartition des participants en trois groupes : RFS, MFS et FFS en fonction de le type de pose de pied.</p>
Critères de jugement principal, Critères de jugement secondaires	<p>Type de pose de pieds. Taux de chargement. Absorption énergétique = puissance articulaire négative de l'articulation lors de la phase d'absorption (= force de freinage).</p>

<p>Protocole</p>	<p>2 visites espacées d'une semaine.</p> <p><u>Première visite : Chaussés</u> Pour but d'évaluer le type de pose de pieds. Tous les participants avaient les mêmes chaussures avec 8mm de drop. Mise en place de capteurs cutanés au niveau du bassin, de la cuisse, de la jambe et du pied de façon bilatérale. Echauffement de 3 minutes Chaque sujet devait compléter 4-6 essais à leur vitesse préférentielle (calculée grâce à deux portes avec des capteurs infrarouges). L'essai était accordé si la vitesse était comprise dans une fourchette de 5% de celle présélectionnée. Aucune autre instruction (pose de pied, cadence) n'ont été données. Un essai était accepté si le pied du membre dominant était entièrement sur la plateforme de force et que la vitesse était respectée. Une semaine après, les participants revenaient pour passer les mêmes tests pieds-nus.</p> <p>Entre les deux séries de test, il était demandé aux participants de garder le même volume d'entraînement.</p>
<p>Analyses statistiques</p>	<p>Répartition des coureurs en 3 groupes : RFS, MFS et FFS en fonction de leur pose de pied. Les changements étaient évalués avec le « one-way ANOVA. ($\alpha \leq 0,05$) Évaluation des différences au sein d'un même groupe entre course pieds-nus ou chaussé avec le test de Student. Différence significative si $p \leq 0,05$.</p>
<p>RESULTATS</p>	<p><u>Vitesse :</u> Pas de différences significatives entre les groupes ou les conditions de course.</p> <p><u>Pose du pied :</u> Sur les 22 coureurs, 8 sont restés en RFS, 9 sont passés en MFS et 5 en FFS pendant une course pieds-nus sans instructions. Les trois groupes ont montrés une augmentation significative de la flexion plantaire de cheville au contact initial en étant pieds-nus.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les coureurs RFS ont augmentés leur flexion plantaire de $8,4 \pm 2,8^\circ$ ($p < 0,001$) • Les coureurs MFS de $20,4 \pm 8,4^\circ$ ($p < 0,001$) • Les coureurs FFS de $22,8 \pm 3,6^\circ$ ($p < 0,001$) <p>Le changement de flexion plantaire entre la course chaussée et pieds-nus était significativement plus important chez les MFS et FFS que chez les RFS (MFS-RFS : $\Delta = 12,2^\circ$; $p = 0,002$ FFS-RFS : $\Delta = 14,4^\circ$; $p = 0,001$).</p>

	<p><u>Taux de chargement :</u> Pieds-nus, les coureurs ayant continué à avoir une foulée RFS ont montrés une augmentation du taux de chargement de 108% ($\Delta = 124 \pm 69$ BW/s ; $p = 0,001$). Alors que les coureurs adoptants une course FFS ont montrés une diminution du taux de chargement de 41% ($\Delta = -44 \pm 24$ BW/s ; $p = 0,014$). Il n'y a pas eu de changement significatif chez les coureurs ayant adopté une course en MFS ($\Delta = 0 \pm 39$ BW/s ; $p = 0,989$). Les changements des taux de chargement à travers les conditions de course sont significativement différents entre MFS et RFS ($\Delta = 124$ BW/s ; $p < 0,001$) et entre FFS et RFS ($\Delta = 168$ BW/s ; $p < 0,001$).</p> <p><u>Absorption énergétique :</u> Tous les groupes ont montrés une réduction significative de l'absorption énergétique au niveau du genou lors de la course pieds-nus.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les RFS l'ont diminué de 25% ($2,9 \pm 2,1$ J/kg ; $p = 0,011$). • Les MFS par 51% ($5,1 \pm 2,0$ J/kg ; $p < 0,001$). • Les FFS de 39% ($3,4 \pm 0,7$ J/kg ; $p = 0,002$). <p>Il n'y avait pas de différence significative entre les groupes. Les coureurs qui passaient en MFS en étants pieds-nus ont montrés une augmentation significative de 146% d'absorption d'énergie au niveau de la cheville ($5,0 \pm 2,5$ J/kg ; $p < 0,001$). Ceux qui sont passés en FFS ont montrés une augmentation de 140% ($5,5 \pm 1,2$ J/kg ; $p = 0,001$). Les coureurs ayant gardé une foulée RFS n'ont pas eu de changement au niveau de la cheville. Le changement de l'absorption d'énergie au niveau de la cheville à travers les conditions de courses sont significativement plus important en MFS et FFS qu'en RFS (MFS-RFS : $\Delta = 4,0$ J/kg ; $p = 0,001$ FFS-RFS : $\Delta = 4,6$ J/kg ; $p = 0,001$).</p>
<p>DISCUSSION</p>	<p>Plus grand pourcentage de participants ayants adopté une foulée MFS (n=9) ou FFS (n=5) que dans les études précédentes de courses pieds-nus sans instructions. Cependant, plus du tiers (n=8) sont restés en RFS. Ces résultats sont en accord avec l'hypothèse de départ d'avoir plusieurs types de pose de pieds chez des coureurs habituellement chaussés qui passaient à une course pieds-nus sans instructions. Une étude a montré que les coureurs RFS habituellement chaussés gardent le même pattern en étant pieds-nus alors qu'une autre à montré qu'il adoptaient une course en MFS.</p> <p>Les coureurs ayants maintenu une course RFS pieds-nus ont montrés des taux de chargement environ 2 fois plus élevés qu'en étant chaussés. Ces résultats sont en accord avec les études précédentes portant sur des sujets ayants obligation de courir en RFS pieds-nus et en chaussures minimalistes. Les coureurs ayants adoptés une course MFS ont montrés des taux de chargement similaires entre la course pieds-nus et chaussés. Ce qui est en contradiction par rapport à une étude qui montre que les coureurs MFS ont</p>

	<p>un taux de chargement diminué. Les coureurs FFS sont les seuls qui ont montrés une diminution du taux de chargement pendant la course pieds-nus ce qui est en accord avec la littérature.</p> <p>Tous les groupes ont montrés une augmentation de flexion plantaire de cheville au contact initial lors de la course pieds-nus. Ce changement contribue à l'augmentation de l'absorption énergétique au niveau de cette articulation chez les coureurs MFS et FFS et à la réduction d'absorption énergétique au niveau du genou. Ce shift de contraintes au niveau du genou n'est pas aussi important chez les coureurs RFS car ils attaquaient le sol avec une flexion plantaire de cheville moins importante.</p> <p><u>Biais :</u> Les participants étaient testés dans le même ordre (d'abord chaussé puis pieds-nus). La décision de ne pas randomiser a été choisie pour ne pas pousser des coureurs RFS à adopter une course FFS en étant chaussés pendant le deuxième test. Les tests ont été conduits au cours d'un laps de temps court et dans un laboratoire d'analyse. De ce fait, ne représentent pas forcément les conditions réelles.</p>
<p>Applicabilité et intérêt clinique</p>	<p>Un certain pourcentage de coureurs habituellement chaussés sont restés en RFS en étant pieds-nus. Cela a augmenté leurs taux de chargement par deux. Des taux de chargements élevés répétés chez ces coureurs pieds-nus en RFS augmenteraient considérablement le risque de blessures.</p> <p>Les bénéfices d'une course pieds-nus apparaissent seulement lorsque la pose du pied se fait en FFS.</p> <p>Le fait que seulement 5 participants sur 22 ont adoptés une foulée FFS pieds-nus indique un besoin d'instructions supplémentaires pour promouvoir ce type de foulée.</p> <p>Passer à une foulée FFS augmente l'absorption énergétique au niveau de la cheville. Une transition douce serait bénéfique afin de préparer le triceps sural, le tendon d'Achille et le tibia postérieur de l'augmentation des contraintes mécaniques.</p> <p><u>Conclusion :</u> Il y a une variabilité de types de pose de pied chez les coureurs habituellement chaussés qui passent à une course pieds-nus sans instructions. Courir pieds-nus a montré une réduction de l'absorption énergétique au niveau du genou peu importe le type de foulée. Cependant, maintenir une foulée RFS pieds-nus augmente significativement les taux de chargement contrairement au fait d'adopter une foulée FFS.</p>

BIBLIOGRAPHIE	Oui.
RESUME	Oui.
Grade HAS	Grade B.

ANNEXE VII : Exemple d'une chaussure minimaliste (*La Clinique du Coureur*) :



ANNEXE VIII : Exemple de chaussure maximaliste (*La Clinique du Coureur*).



RÉSUMÉ :

Introduction : La course à pied est le sport le plus pratiqué par les français. Les blessures liées à cette pratique sportive sont fortement corrélées aux impacts renvoyés par le sol et aux contraintes subies par les différentes articulations ainsi que les muscles. Ces forces se trouvent modifiées en fonction de la cinématique du sportif. Effectivement, une attaque au sol par l'avant-pied a été démontrée comme protectrice par rapport à une attaque par le talon. Le but de cette revue de littérature était de savoir si une transition de chaussage jouait un rôle dans la cinématique de course chez des coureurs confirmés habituellement chaussés, puis d'apprécier les variations cinétiques au niveau des membres inférieurs afin de pouvoir leur prodiguer des conseils adaptés dans le but d'éviter l'apparition de blessures liées à cette transition. Le deuxième objectif était de comprendre la biomécanique de course afin de pouvoir prévenir la récurrence chez un sportif blessé.

Matériel et Méthode : Les bases de données suivantes ont été interrogées : The Cochrane Library, PEDro, PubMed et Science Direct. Les études sélectionnées étudiaient les effets d'une transition de chaussures maximalistes à des chaussures minimalistes ou pieds nus, sur la cinématique et/ou la cinétique des membres inférieurs chez le coureur confirmé. Neuf articles ont été retenus.

Résultats : Le type de chaussage influence la cinématique, qui elle-même joue un rôle sur la cinétique des membres inférieurs chez le coureur. Cependant, une grande hétérogénéité de pose de pieds a été retrouvée lors des études et tous les coureurs n'adoptent pas instinctivement une foulée FFS avec des chaussures minimalistes ou pieds-nus. Cela explique l'augmentation, lors de ces conditions de course sans instructions, des contraintes au niveau du genou et des forces de réaction du sol chez les coureurs en attaque talon (RFS). Les coureurs en attaque en pointe (FFS) ont montré une diminution significative de ces valeurs mais ont significativement augmenté leurs contraintes au niveau de la cheville, de l'avant-pied et des muscles postérieurs de la jambe.

Discussion : Ce travail souligne l'importance de la cinématique des membres inférieurs lors des différentes conditions de chaussage. Des conseils concernant la foulée ainsi que des exercices de préparation physique semblent être importants dans la prévention de survenue ou de récurrence de blessures chez le sportif effectuant la transition ou non.

Mots clés : biomécanique, course à pied, minimalisme, pieds-nus, transition.

ABSTRACT:

Introduction: Running is the most practiced sport by French people. Running related injuries are highly correlated to ground reaction forces, joint and muscle stress. These forces are modified by the kinematic of the runner. Effectively, a fore foot strike (FFS) have been shown to be more protective than a rear foot strike (RFS). The aim of this review was to determine if a transition to minimalist or barefoot running affects the kinematics of confirmed habitually shod runners. We also studied the lower limb kinetics variations to be able to give them advices during the transition to prevent injuries due to the transition. The last objective was to understand the running biomechanics to prevent recidivism of running related injuries.

Material and Method: The following data bases were interrogated: The Cochrane Library, PEDro, PubMed and Science Direct. The selected studies evaluated the effects of a transition to minimalist shoes or barefoot on the lower limb's kinematic and/or the kinetic of the confirmed runner. Nine studies were selected.

Results: The running conditions without instructions influence the kinematic that affects the kinetic of the lower limb. However, There is a big heterogeneity concerning foot strike patterns and all the runners do not adopt a FFS pattern when running with minimalist shoes or barefoot. This variation explains the augmentation of the ground reaction forces and knee forces with minimalist shoes or barefoot when runners are in a RFS pattern. These forces were lower for FFS runners, but they shoed higher forces at the ankle, the plantar-flexor muscles of the shank and to the fore foot.

Discussion: This review highlights the importance of the lower limb kinematic during barefoot or minimalist running. Instructions concerning the running pattern and physic conditioning exercises seem to be important to prevent the occurrence of running related injuries during the transition. These advices are applicable to prevent the recidivism of these injuries.

Keywords: biomechanics, running, minimalism, barefoot, transition.