

# Diplôme d'Université

## Trail Running

---

“Influence de la chaussure sur  
la biomécanique de course”



Présenté par Florian Marquié

Promotion 2021

---

Sous la direction de Samuel Verges

## Résumé :

---

La course à pied est un sport en plein essor ces dernières années, malgré les technologies toujours plus innovantes, 1 coureur sur 2 se blesse chaque année.

Au travers d'une étude sur 81 coureurs de différents niveaux, nous avons essayé de trouver des réponses à la question : « quelle est l'influence de la chaussure sur la biomécanique de course ? »

Pour cela nous avons analysé sur tapis roulant différents paramètres de la biomécanique de course chez les coureurs avec chaussures et pieds nus.

Il en ressort comme résultat, une diminution significative de la cadence, de l'angle du genou et de la distance de pose du pied par rapport au centre de gravité. La pose du pied passe d'une attaque talon à une attaque médio / avant pied. Le bruit est lui aussi nettement diminué.

Certaines caractéristiques, comme l'indice minimaliste des chaussures et le nombre de kilomètres couru par semaine peuvent dans certains cas avoir une influence sur la biomécanique de course.

On peut conclure que la chaussure exerce une réelle influence sur notre biomécanique de course. Il nous paraît important de la prendre en compte dans la prévention des blessures.

Mots clés : course à pied, trail-running, cinétique, cinématique, chaussures de course, course pieds nus

## Remerciements :

---

Un grand merci à toutes les personnes qui m'ont accompagné dans la réalisation de cette étude et du mémoire :

- Samuel Verges pour la relecture du mémoire et ses précieux conseils pour l'analyse des données.
- Le Centre le Sart – Pavé de Lille qui a contribué à l'aide technique et les locaux pour la réalisation de l'études dans sa globalité.
- Les patients pour leurs contributions.
- L'ensemble des relecteurs.

# Sommaire

---

Introduction :	2
1.0 Analyse de la littérature	3
1.1 La biomécanique de course	3
1.2 La chaussure de course à pied	4
1.3 La cadence	6
2.0 Objectifs	7
3.0 Méthodologie	8
3.1 Participants	8
3.2 Description du protocole	11
3.3 Mesures	12
3.4 Analyses	15
3.5 Résultats de l'étude	16
3.5.1 Différence pour chaque paramètre entre course avec chaussures et pieds nus	16
3.5.2 Liens entre les deltas chaussures – pieds nus de chaque paramètre de la foulée et certaines caractéristiques des coureurs.	19
4.0 Discussion	23
4.1 Résultats	23
4.1.1 Influence de la chaussure sur la biomécanique de course	23
4.1.2 Influence de l'indice minimaliste des chaussures	23
4.1.3 Influence du nombre de kilomètres hebdomadaire des coureurs	24
4.1.4 Comparaison de coureurs avec une attaque talon versus medio/avant pied dans le groupe chaussures	24
4.2 Recommandations	24
4.3 Limites	24
4.4 Pistes futures	25
Conclusion :	26
Sources :	27

# Introduction :

---

Le trail-running en France est un des sports les plus populaires avec plus de 1 million de pratiquants (source FIFAS 2018). Ce chiffre monte à 13 millions si l'on considère la course à pied en général.

C'est un sport qui est accessible au plus grand nombre avec un budget réduit, même si celui-ci peut vite devenir conséquent. Les enjeux financiers ne cessent de grandir avec du matériel de plus en plus perfectionné. Les fabricants de chaussures se livrent une guerre sans merci en permanence en proposant sans cesse de nouvelles technologies toujours plus innovantes.

Il est intéressant de constater que malgré cette course technologique, la course à pied reste un des sports où on se blesse le plus. BERMON<sup>1</sup> nous apporte des statistiques intéressantes sur la course à pied : « Le taux d'incidence annuel global des blessures liées à la course à pied varie entre 37 et 56 %. Cette incidence peut varier encore plus selon la spécificité du groupe de coureurs concernés et la définition des blessures et a été plus récemment estimée entre 15 % et 85 %. Si elle est calculée en fonction de l'exposition du temps de course, l'incidence rapportée dans la littérature varie de 2,5 à 12,1 blessures pour 1000 heures de course : la plupart des blessures de course étant des blessures des membres inférieurs, avec une prédominance pour le genou, et des blessures de surmenage. »

Il nous paraît pertinent de se poser la question de savoir si les technologies de contrôle de la pronation, de semelles amortissantes, de gels, de contrôle de la foulée (guide line technologies) sont des moyens efficaces de prévenir les blessures et si elles ont un réel intérêt pour les coureurs.

Aussi, dans un premier temps nous ferons un état des lieux de la science sur la biomécanique de course à pied et sur les chaussures. Dans un deuxième temps nous décrirons la méthodologie de l'étude que nous avons réalisée, ainsi que l'analyse des résultats. Nous terminerons par une discussion avec les limites de l'étude.

# 1.0 Analyse de la littérature

---

La littérature sur le thème de la course à pied est très abondante et concerne un large éventail de sujets. Ces dernières années beaucoup d'intérêt est suscité par la prévention des blessures en course à pied et l'optimisation de la performance.

Concernant notre étude, les sujets suivants ont été jugés pertinents et mesurables :

- La cadence
- La biomécanique de course
- Les chaussures de courses à pied

## 1.1 La biomécanique de course

La biomécanique de course à pied se décompose en 4 cycles

- A : on arme la jambe en avant du corps
- B : pose du pied au sol
- C : poussée de la jambe sur le sol et vers l'arrière
- D : retour de la jambe sous le centre de gravité

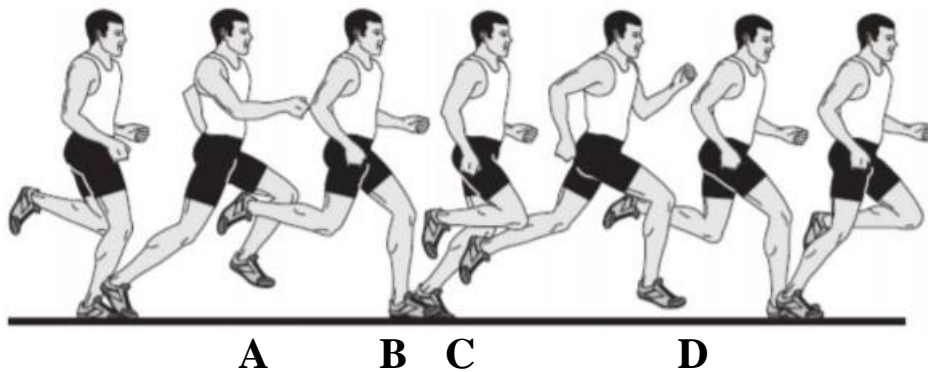


Figure 1 : la foulée du coureur, tiré de Leboeuf et al., 2006

La revue de littérature de Blaise Dubois<sup>6</sup> nous apprend qu'aucune technique de course particulière pourrait réduire l'incidence des blessures en course à pied. En revanche plusieurs paramètres peuvent être facilement modifiés afin de réduire la vitesse de force d'impact au sol qui est à l'origine de plusieurs pathologies. Les paramètres pouvant être modifiés sont les suivants :

- Augmenter la cadence
- Diminuer l'interface avec le sol a comme effet de diminuer les forces d'impact au sol et réduire la longueur de la foulée
- Correction volontaire : faire moins de bruit et poser le pied à plat

La même étude nous dit aussi que les personnes qui ont une foulée de 160 pas par minute posent le pied souvent en avant de leur centre de gravité avec une attaque talon, Cette façon de courir augmenterait les forces d'impacts. Nous allons essayer de vérifier ces paramètres dans notre étude.

## 1.2 La chaussure de course à pied

Longtemps vue comme le moyen ultime de prévention des blessures, elle fut en permanence améliorée. Lieberman<sup>7</sup> en 2010 décrivait que des coureurs chaussés et pieds nus n'avaient pas la même foulée. Tandis que les coureurs pieds nus avaient tendance à attaquer médio/avant pied pour amortir l'impact, les coureurs en chaussures posent le talon en premier pour profiter de la mollesse de leur chaussure. L'angle d'attaque du pied est totalement modifié, passant d'un angle positif en attaque talon à un angle négatif en attaque avant pied.

Blaise Dubois<sup>6</sup>, dans son livre nous indique qu' « il ne fait aucun doute que réduire l'interface entre le pied et le sol, à l'extrême courir pieds nus, induit des changements biomécaniques aigus de modulation d'impact chez la majorité des coureurs. » L'absence de preuves scientifiques sur le long terme laisse néanmoins planer le doute sur la persistance de ces changements.

Il précise que les études observationnelles sont unanimes et nous disent :

- 95% des coureurs récréatifs attaquent talon avec des chaussures traditionnelles avec une cadence < 160 pas/min et ont un angle pied sol moyen de 20°
- Les coureurs habitués à courir pieds nus ont une cadence qui se rapproche de 180 pas/min et une attaque médio avant pied

Il nous paraît important de faire un point sur les différentes catégories de chaussures en fonction de l'indice minimaliste qui est souvent utilisé dans la littérature pour différencier les « grosses » chaussures dites maximalistes par rapport aux chaussures minimalistes plus proches du pied nu.

Selon la définition de l'indice minimaliste<sup>8</sup> publié le 19-08-2015 « Chaussures offrant une interférence minimale avec le mouvement naturel du pied en raison de sa grande flexibilité, de sa faible chute du talon aux orteils, du poids et de la hauteur de la pile, et de l'absence de contrôle du mouvement et dispositifs de stabilité »

Cet indice est calculé en fonction de 5 critères de la chaussure :

- Flexibilité
- Poids
- Epaisseur de la semelle
- Drop
- Technologie de stabilisation de la chaussure

Plus l'indice se rapproche des 100%, plus la chaussure est minimaliste et proche du pied nu. A l'inverse plus elle tend vers 0% et plus la chaussure a une interface importante avec le sol et une rigidité importante.

Nous avons observé que dans la littérature, beaucoup d'études se focalisent sur l'influence des chaussures minimalistes par rapport aux chaussures maximalistes. Cependant, nous n'avons pas trouvé d'étude analysant l'impact de la chaussure en elle-même sur la biomécanique de course.



## 1.3 La cadence

Elle fait partie des facteurs qui sont devenus très facile de mesurer avec les montres connectées ou tout simplement en comptant le nombre de pas que l'ont fait sur 1min.

Ce paramètre nous intéresse particulièrement car il est facile à utiliser en cabinet pour conseiller les patients.

L'étude de KLIETHERMES<sup>2</sup> nous apprend qu'une cadence faible est un facteur de risque de blessure.

MUSGJERD<sup>3</sup> nous indique que « l'augmentation de la cadence de 7 % en moyenne dans un environnement extérieur a entraîné une diminution de la force d'impact maximale à deux moments différents au cours d'une course de 2,4 miles. (Environ 3,8 kilomètres) »

Récemment, en 2021, QUIN<sup>4</sup> nous indique que « s'entraîner à courir à une cadence de pas plus rapide peut être une technique viable pour améliorer l'économie de course »

Blaise Dubois dans son livre<sup>5</sup> nous indique que selon différentes études la cadence idéale serait de 180 pas / min +/- 10 à vitesse de performance. Il nous indique aussi que courir pieds nus augmente la cadence de 15 pas/min en moyenne. Nous aurons l'occasion de vérifier ce paramètre dans notre échantillon de coureurs.

D'après toutes ces recommandations, on considèrera donc une cadence comme « faible » quand elle sera autour de 160 pas/min et « idéale » lorsqu'elle avoisinera les 180 pas/min

## 2.0 Objectifs

---

Le premier objectif de ce mémoire va être d'étudier sur un échantillon de 81 coureurs différentes paramètres cinétiques de leurs foulées avec et sans chaussures sur tapis roulant pour répondre à la question suivante :

**“Quelle est l'influence de la chaussure sur la biomécanique de course ?”**

Nous essayerons par la suite de faire des corrélations et des comparaisons entre les différents paramètres des coureurs (poids, taille, indice minimaliste des chaussures, nombre de kilomètres courus par semaine, niveaux) et les différents paramètres cinématiques de la course mesurés et observés pour répondre à deux questions secondaires :

- Les paramètres morphologiques du coureur exercent-ils une influence sur la biomécanique de course ?
- L'indice minimaliste des chaussures a-t-il une incidence sur la variation des différents paramètres cinématiques de la course ?

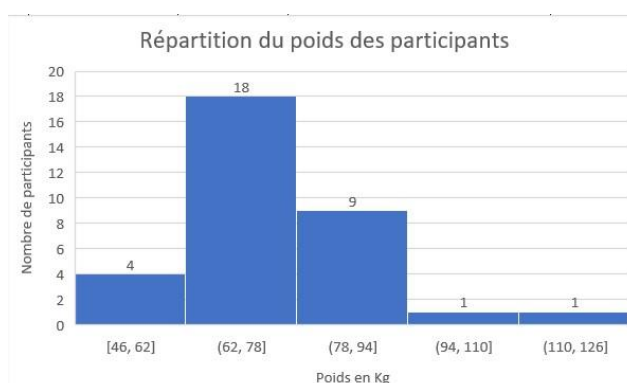
## 3.0 Méthodologie

### 3.1 Participants

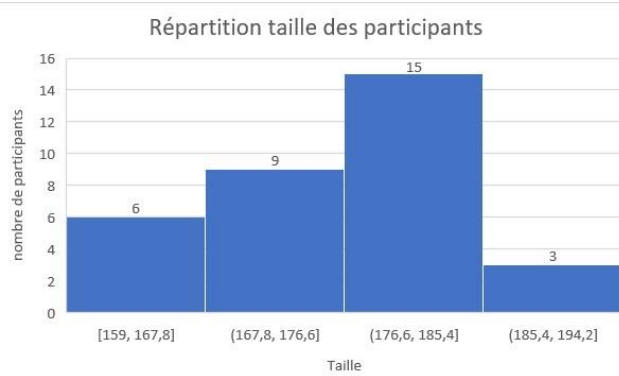
L'étude porte sur 81 participants de tous niveaux et avec un âge compris entre 25 et 60 ans. Les distances parcourues vont du 5km à l'ultra trail. Les types de terrains couvrent la route et le trail en montagne. Les coureurs ont été recrutés et analysés par un kinésithérapeute en cabinet libéral pour une analyse biomécanique dans un but de prévention des blessures ou de performances. Certains étaient blessés, d'autres non. Les statistiques des coureurs et leurs caractéristiques sont disponibles dans les graphiques ci-dessous.

Voici les données que nous utilisons sur les différents participants :

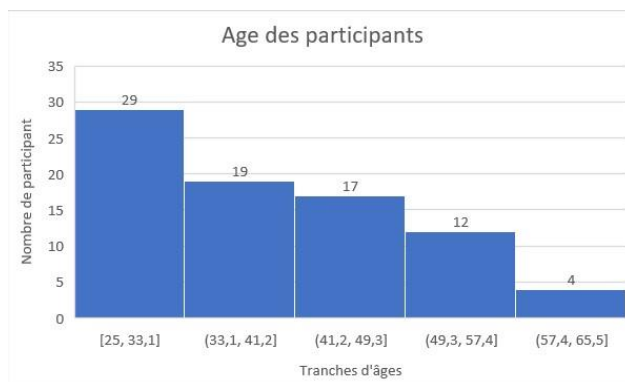
- Poids
- Taille
- Age
- Indice minimaliste des chaussures (> ou < à 75%)
- Niveaux (1 : débutant, 2 : expérimenté, 3 : élite)
- Localisation de la douleur de consultation s'il y en a une
- Nombre de km/semaine courus en moyenne
- Type de terrain : trail, route ou mixte



Avec un poids moyen de **76 +/- 14.4 Kg**



Avec une taille moyenne de **176 +/- 8 cm**



Avec un Age moyen de **39 +/- 10 ans**



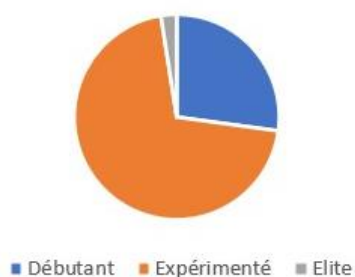
Nous avons classé les chaussures des participants en 2 catégories :

Indice > 75% = chaussures minimalistes

Indice < 75% = chaussures maximalistes

Le classement a été déterminé en fonction de la base de données des indices minimalistes des chaussures présentes sur le site de [lacliniqueducoureur.fr](http://lacliniqueducoureur.fr)

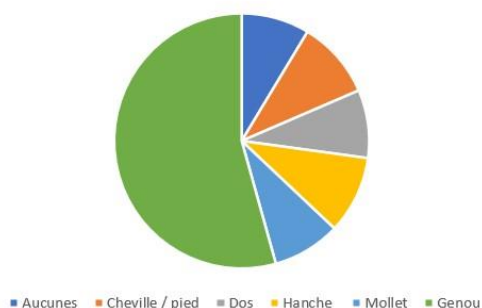
Répartition niveau des coureurs



Les coureurs ont été catégorisés en 3 niveaux en fonction du nombre d'années de course :

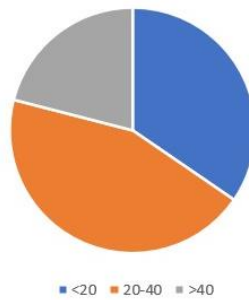
- < 5 ans de pratique = Débutant
- > 5 ans de pratique = Expérimenté
- Compétition internationale = Elite

Douleur principale de consultation



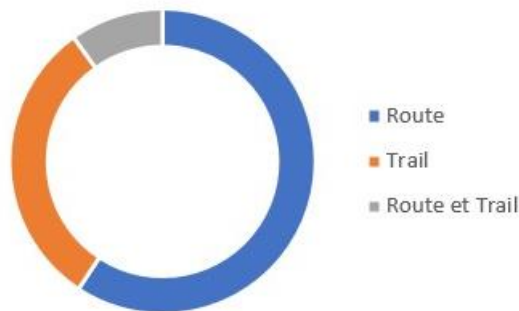
Cette catégorisation a été établie en fonction du bilan de consultation avec la pathologie la plus importante de consultation. On remarque que les douleurs aux genoux sont très largement majoritaires sur l'étude. Nous remarquons que nos statistiques sont en adéquation avec l'étude de BERMON<sup>1</sup> qui met en avant que le genou est la zone de blessure la plus fréquente chez les coureurs.

Répartition fréquence de pratique



Ce graphique représente le nombre de kilomètres hebdomadaire moyen des participants. La majorité pratique entre 20 et 40km / semaine

Type de pratique



Concernant le niveau de pratique le groupe est hétérogène entre route et Trail.

## 3.2 Description du protocole

Le protocole a été conçu dans l'idée de mesurer la différence de biomécanique de course avec et sans chaussure. Pour garantir la reproductibilité des mesures avec et sans chaussure, l'étude a été réalisée sur tapis roulant à vitesse constante (Elle est choisie par le participant lui-même et identique pieds nus et en chaussures).

Les prises de vues sont les mêmes dans les 2 situations :

- Une prise avec vue latérale sur la droite du coureur.
- Une prise de derrière.

Entre les 2 séquences (avec et sans chaussures), aucune consigne n'est donnée au coureur. Il enlève juste ses chaussures et court pieds nus.

Les coureurs ont donné leur consentement à l'utilisation de leurs données de manière anonyme pour l'étude.

### 3.3 Mesures

L'analyse des séquences se fait via le logiciel Dartfish qui permet la mesure d'angle et de distance sur les séquences vidéo. Différentes mesures ont été réalisées afin de mettre en évidence l'impact de la chaussure sur la biomécanique de course.

Nous avons défini de manière arbitraire que toutes les mesures sont réalisées avec chaussure et pieds nus sur le membre inférieur droit. Il s'agit du membre exposé à la caméra.

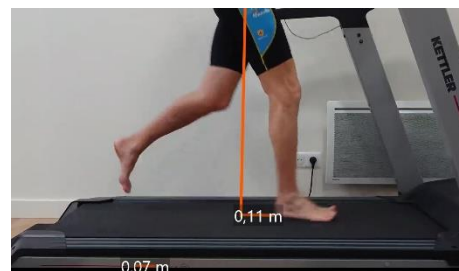
Les mesures avec chaussures sont effectuées après 6 min de course continu sur le tapis pour laisser un temps d'adaptation et d'échauffement aux coureurs. La durée de mesure est de 45 secondes en chaussures puis 45 secondes pieds nus.

Voici les différentes variables :

- **Cadence** : Il s'agit du nombre de pas par minute. Elle a été mesurée via l'application "Tap tempo" qui permet une mesure en temps réel de la cadence par le kiné.
- **Bruit** : Mesure de manière qualitative par l'examineur selon 3 niveaux. 1 : pas de bruit, 2 : bruit modéré et 3 : bruit important.
- **Distance entre le centre de gravité et le talon lors du contact du pied au sol** : Pour cette mesure, la séquence est arrêtée lorsque le pied touche le tapis. Avec l'aide du logiciel Dartfish on trace une ligne verticale sous le centre de gravité puis on mesure la distance entre cette ligne et le talon du participant. La mesure est étalonnée avec le logo de la marque du tapis dont on connaît la mesure (7cm).



Avec chaussures

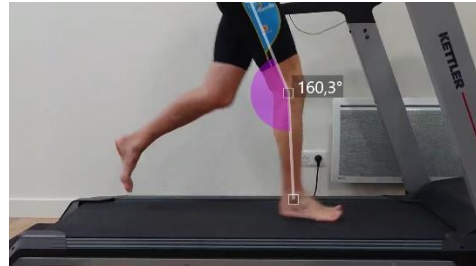


Pieds nus

- **Angle du genou lors de la pose du pied sur le tapis** : cette mesure est réalisée sur la même séquence que la précédente. Les points de repères sont : l'axe du fémur pour la branche supérieure, la malléole externe pour la branche inférieure. Le point de repère pour le genou est le condyle externe.

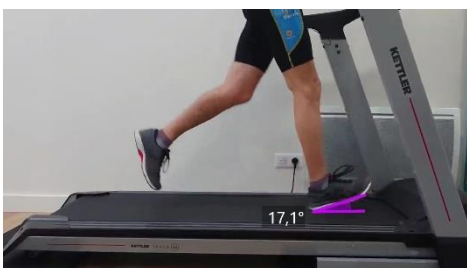


Avec chaussures

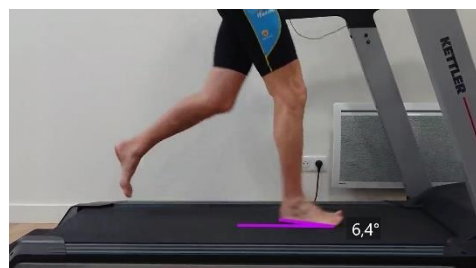


Pieds nus

- **Angle de la cheville lors du contact avec le tapis** : 2 cas de figures possibles :
  - Attaque talon : on mesure l'angle entre le talon et le tapis. Les points de repères sont : le talon, le tapis pour la branche inférieure et la semelle de la chaussure ou le pied pour la branche supérieure.
  - Attaque médio / avant pied : on mesure l'angle entre le tapis et le pied ou la chaussure. La mesure sera notée en négatif sur le tableau de données. Les points de repères sont : le point de contact entre l'avant pied et le tapis, le tapis pour la branche inférieure et le pied ou la semelle de la chaussure pour la branche supérieure.



Avec chaussures



Pieds nus



- **Attaque du pied :**

Il s'agit d'une mesure observationnelle qui permet de catégoriser les patients entre attaqueur talon et médio/avant pied. Certaines classifications utilisent 3 catégories : talon, médio pied et avant pied. Nous avons choisi d'en avoir seulement 2 car la différence entre médio pied et avant pied n'est pas claire dans la littérature et difficilement objectivable sur les vidéos.

**Les 2 catégories :**

- *Médio/avant pied* : le talon ne touche pas le sol en premier
- *Talon* : le talon touche le tapis en premier

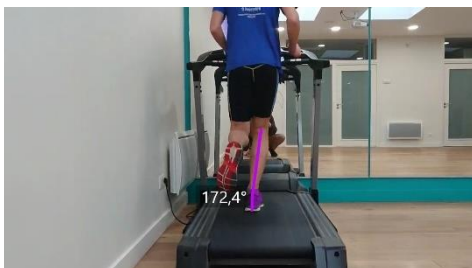
- **Angle Tendon d'Achille / Calcanéum :**

Mesure de l'angle à l'insertion du tendon d'Achille. Centre de la mesure sur l'insertion du tendon d'Achille. La branche supérieure sur le tendon d'Achille et la branche inférieure sur dans l'axe du milieu du calcanéum.

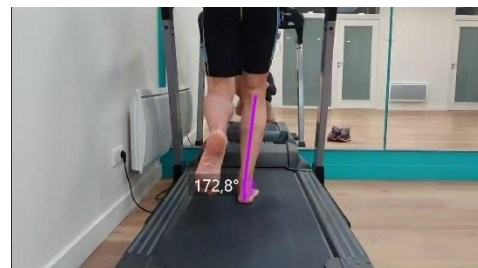
L'objectif est de mesurer la prono-supination du pied lors du plein appui.

- **Pronation / supination / neutre**

- Valeur qualitative issue de la mesure de l'angle tendon d'Achille / Calcanéum



Avec chaussures



Pieds nus

### 3.4 Analyses :

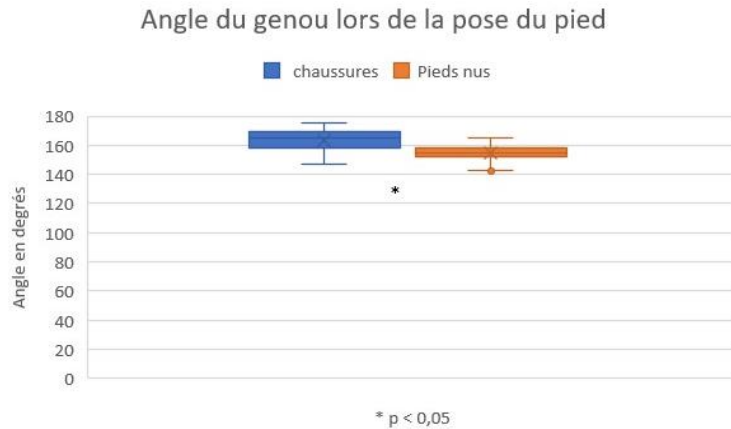
Pour l'analyse des données nous allons utiliser le test de Student (t-test) apparié pour voir si pour chaque paramètre, il y a une différence significative dans notre échantillon de coureurs entre les mesures avec chaussures et sans chaussures. Les résultats seront représentés sous forme de boîte à moustaches avec une \* si le résultat est statistiquement significatif, c'est-à-dire si  $p < 0.05$  au t-test.

Dans un deuxième temps nous analyserons pour chaque paramètre de la course, s'il y a une différence de delta de la mesure pieds nus - chaussures en fonction des différentes caractéristiques des coureurs (poids, taille, âge, etc...). Pour cela nous utiliserons un test de Student non apparié pour voir s'il y a une différence significative du delta pieds nus - chaussures entre des sous-groupes de sujets (catégorisés selon leur niveau de pratique ou autres variables catégorielles ; par exemple s'il y a une différence significative entre la variation de cadence des coureurs avec des chaussures minimalistes par rapport au coureur en chaussures maximalistes).

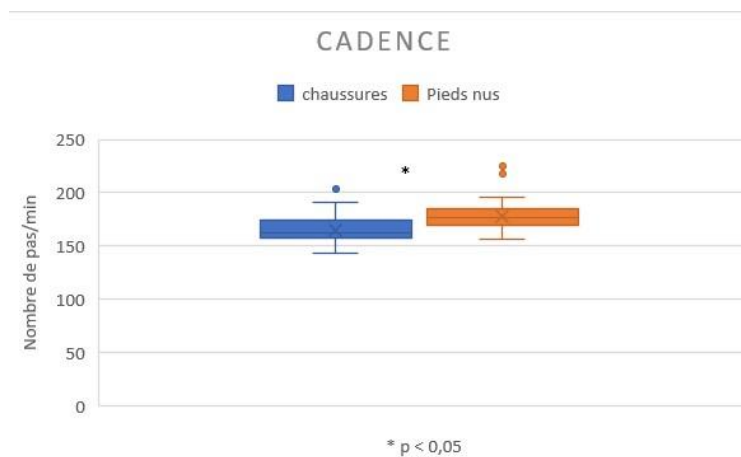
Pour les caractéristiques non-catégorielles des sujets, nous utiliserons la corrélation de Pearson pour rechercher des liens entre le delta des paramètres de foulée pieds nus - chaussures et certaines caractéristiques du coureur (variables continues : âge, poids...). Le coefficient de corrélation ( $r^2$ ) obtenu rendra compte de la force de l'association entre les deux variables.

## 3.5 Résultats de l'étude

### 3.5.1 Différence pour chaque paramètre entre course avec chaussures et pieds nus

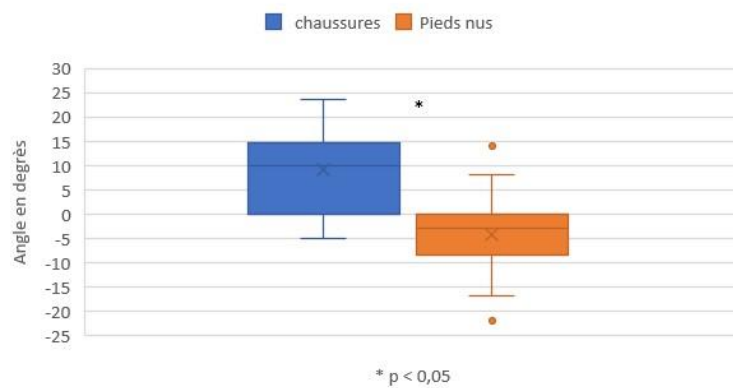


Lors de la pose du pied au sol, quand les coureurs enlèvent les chaussures, l'angle diminue de manière significative. Le genou est plus fléchi, on peut supposer qu'il y a une meilleure absorption des impacts. La moyenne passe de 163° avec chaussures à 154° pieds nus.



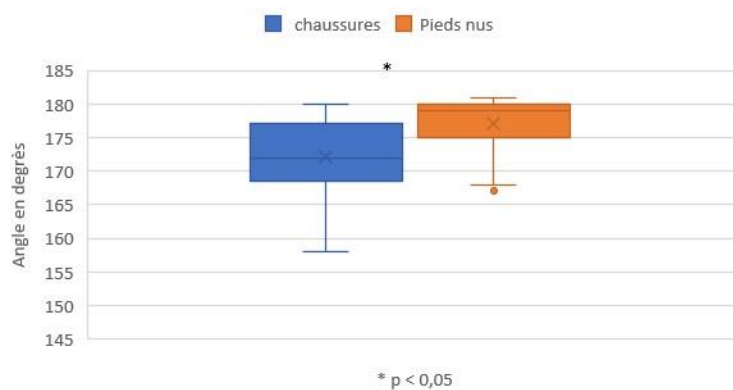
On observe que la cadence augmente de manière significative dès lors que l'on enlève les chaussures. Elle est plus élevée en moyenne de 12 pas / min.

### Angle de la cheville lors du contact au pied/sol

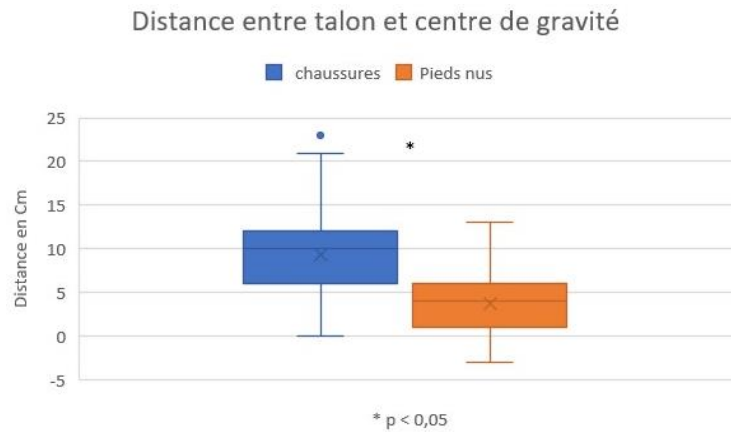


L'angle de la cheville passe d'une mesure positive avec les chaussures, avec une attaque du pied majoritairement talon, à une mesure négative qui signifie une attaque sur le médio avant pied, en situation pieds nus. En chaussures les coureurs ont un angle d'attaque moyen de 9° et de -4° pieds nus.

### Angle de prono / supination



On remarque que l'angle de pronation est significativement plus prononcé avec les chaussures. Dès qu'on passe pieds nus, l'angle se rapproche de la neutralité. Ce graphique apporte déjà des éléments de réponse à la question principale, à savoir que la chaussure exercerait une influence sur la pronation du pied en course à pied.



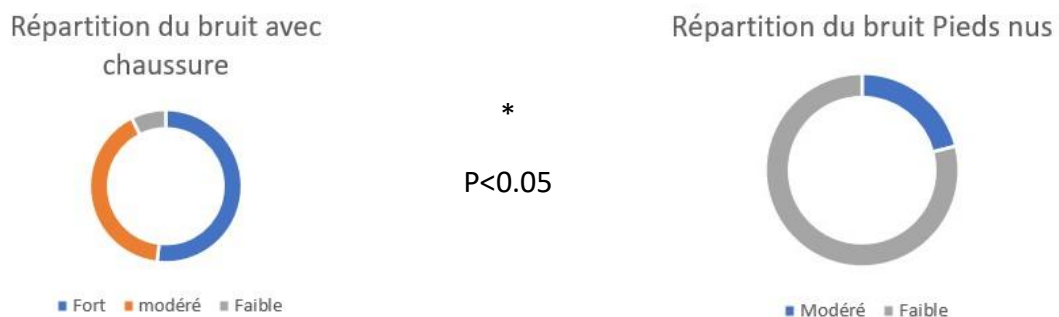
La distance entre le talon et le centre de gravité est significativement plus courte chez les coureurs pieds nus. On retrouve une différence de 5 cm entre les 2 moyennes.

En définitive sur cette première série de résultats, on remarque que la chaussure a une influence significative sur beaucoup de paramètres qui sont eux-mêmes interdépendants. Dès que les coureurs passent pieds nus on remarque :

- Une augmentation de la cadence
- Un rapprochement du talon du centre de gravité
- Une diminution de la pronation
- Un changement de foulée en faveurs du médio avant pied
- Une diminution de l'angle du genou

Tous cela à vitesse constante, le seul paramètre modifié est la suppression de la chaussure.

Il paraît intéressant de pousser la réflexion plus loin afin de déterminer si certaines caractéristiques des coureurs peuvent exercer une influence significative sur la modification de la foulée lorsque l'on enlève les chaussures.



On observe une différence significative de bruit quand les coureurs passent pieds nus.

### 3.5.2 Liens entre les deltas chaussures – pieds nus de chaque paramètre de la foulée et certaines caractéristiques des coureurs.

#### *Poids, taille et l'âge*

Nous avons tout d'abord évalué si l'âge, la taille ou le poids peut exercer une influence sur les différents deltas pieds nus - chaussures mesurés. Nous n'avons trouvé aucune corrélation significative entre les deltas pieds nus – chaussures et le poids, la taille ou l'âge des sujets.

#### *Autres caractéristiques du coureur*

Pour les caractéristiques des coureurs sous forme de catégories, nous avons comparé les deltas pieds nus – chaussures entre sous-groupes de coureurs (catégorisés par niveau, nombre de kilomètres hebdomadaire, indice minimaliste des chaussures, type de course et leur pathologie) avec :

#### - **Le delta de cadence induit :**

Delta cadence / IM Chaussures			Moyenne 1	5,625
			Moyenne 2	13,7945205
1 versus 2	p=	0,00942847		

Légende : 1 = Indice minimaliste > 75% 2 = Indice minimaliste < 75%

Une différence significative apparaît entre sous-groupes de coureurs présentant un indice minimaliste >75% ou <75%. Les coureurs avec un indice minimaliste > 75% ont une variation de cadence moyenne de 5.6 pas/min et les autres de 13.8 pas/min.

On peut dire que sur notre échantillon, les coureurs avec un indice minimaliste > 75% ont une variation de cadence induite par le fait de courir pieds nus significativement inférieure aux coureurs avec des chaussures avec un indice < 75%

On peut penser que ces coureurs ont une foulée déjà très proche de leurs foulée naturelle. La variation lors du passage pieds nus est de fait plus faible.

Aucune autre sous-catégorie de coureurs ne présente une différence significative d'effet de la course pieds nus sur la cadence.

**- Le delta de la distance du talon par rapport au centre de gravité**

Delta CG / Nombre de Km				
				Moyenne 1 -6,14285714
1 versus 2	p=	0,921677		Moyenne 2 -6,25
2 versus 3	p=	0,0084552		Moyenne 3 -3,17647059
1 versus 3	p=	0,03890444		

Légende : 1= Moins de 20km/sem 2= Entre 20 et 40km/sem 3= Plus de 40km/sem

On remarque une différence significative entre les coureurs qui font plus de 40 kilomètres par semaine et les 2 autres sous-groupes. On peut supposer que les coureurs qui courent beaucoup de kilomètres par semaine adoptent des comportements de modération des forces d'impacts intéressants en rapprochant les pieds de leur centre de gravité lorsqu'ils courent habituellement en chaussures, et qu'ainsi lorsqu'ils courent pieds nus la diminution de distance entre le talon et le centre de gravité est moindre.

Aucune autre sous-catégorie de coureurs ne présente une différence significative d'effet de la course pieds nus sur ce paramètre.

**- Le delta de l'angle du genou lors de la pose du pied au sol**

Delta genou / IM Chaussures				
				Moyenne 1 -3,125
				Moyenne 2 -9,67123288
1 versus 2	p=	0,00625717		

Légende : 1 = Indice minimaliste > 75% 2 = Indice minimaliste < 75%

L'indice minimaliste a une influence significative sur la variation de l'angle au niveau du genou. Les coureurs qui ont l'habitude de courir en chaussures minimalistes ont une variation de l'angle plus faible que les autres lorsqu'ils courent pieds nus par rapport à la condition en chaussures.

Aucune autre sous-catégorie de coureurs ne présente une différence significative d'effet de la course pieds nus sur ce paramètre.

- **Le delta de l'angle de la cheville lors de la pose du pied au sol**

Delta Cheville / IM Chaussures		Moyenne 1	-4
		Moyenne 2	-14,530137
1 versus 2	p=	0,00518109	

Légende : 1 = Indice minimaliste > 75% 2 = Indice minimaliste < 75%

Les coureurs qui courent en chaussures minimalistes ont une moindre variation de leur angle de cheville lors de l'impact du pied au sol lorsqu'ils courent pieds nus par rapport à la condition en chaussures. Les coureurs qui ont des chaussures maximalistes ont une variation moyenne de leurs angles de cheville de 14.5°.

Delta Cheville / Nombre de Km			Moyenne 1	-13,6285714
1 versus 2	p=	0,49795971	Moyenne 2	-15,3638889
2 versus 3	p=	0,03157714	Moyenne 3	-9,29411765
1 versus 3	p=	0,20906407		

Légende : 1= Moins de 20km/sem 2= Entre 20 et 40km/sem 3= Plus de 40km/sem

Au niveau du nombre de km couru par les sujets, on note une moindre modification de l'angle de la cheville au passage en condition pieds nus chez les coureurs qui courent plus de 40km/sem par rapport à la catégorie 20-40km.

- **Le delta de l'angle de prono-supination**

Delta talon / IM Chaussures		Moyenne 1	1,625
		Moyenne 2	5,31506849
1 versus 2	p=	0,06826239	

Légende : 1 = Indice minimaliste > 75% 2 = Indice minimaliste < 75%

Les coureurs avec des chaussures minimalistes ont une modification de l'angle de pronation lorsqu'ils passent en condition pieds nus plus faible. Le p n'est pas < 0.05 mais s'en approche. Il serait intéressant de vérifier ce paramètre avec un échantillon plus grand.



- La modification du bruit lorsque les sujets enlèvent leurs chaussures ne présentent pas de différence entre les sous-catégories de coureurs. Dans tous les cas, il est significativement plus faible en condition pieds nus
- Pour finir on a comparé les **différents deltas de paramètres de foulée induits par le passage pieds nus en fonction du type de foulée des sujets en chaussures**

comparaison entre l'attaque du pied en chaussure (talon ou médio/avant pied) et les différents deltas.						
Delta centre de gravité	p=	2,7406E-07	M1 =	-6,93333333	M2=	-1,66666667
Delta angle du genou	p=	3,05637E-05	M1 =	-10,7333333	M2=	-4,14285714
Delta angle de la cheville	p=	3,0957E-14	M1 =	-17,845	M2=	-1,04761905
Delta angle talo/calcanéum	p=	0,044536084	M1 =	5,66666667	M2=	2,9047619
p < 0,05 dans les 4 cas						

Légende :

1= Talon

2= Médio/ Avant pied

La différence est significative pour les 4 paramètres de foulée. On peut conclure que chez les coureurs qui ont une attaque talon, la variation de distance entre le centre de gravité et le talon ainsi que les différents deltas d'angles induits par le passage en condition pieds nus sont significativement plus grands que pour les coureurs qui ont une attaque médio/avant pied en chaussures.

## 4.0 Discussion

---

### 4.1 Résultats

#### 4.1.1 Influence de la chaussure sur la biomécanique de course

Lorsque l'on compare l'effet sur les paramètres de la foulée de courir pieds nus par rapport à la condition en chaussures, les résultats sont dans leur ensemble très significatifs. Dans notre échantillon la chaussure a une influence sur la cadence avec une augmentation de 12 pas/min pieds nus.

L'attaque du pied passe d'un angle positif qui montre une attaque talon à un angle négatif d'une attaque médio/avant pied en condition pieds nus. L'angle du genou et la distance centre de gravité / talon sont diminués pieds nus. Les coureurs posent le pied plus proche de leur centre de gravité, ce qui amènerait à de meilleurs comportements de modération des forces d'impact au sol.

#### 4.1.2 Influence de l'indice minimaliste des chaussures

On remarque dans les résultats que l'indice minimaliste des chaussures habituellement utilisées par les sujets a une influence significative sur les différents deltas pieds nus - chaussures des angles du genou, de la cheville et de la pronation ainsi que sur la cadence.

La caractéristique des chaussures avec un indice minimaliste fort  $> 75\%$  est de se rapprocher du pied nu. Cela peut expliquer que les modifications de la foulée induites par le fait de courir pieds nus chez ces personnes soit moins importantes car elles possèdent déjà des chaussures proches du pied nu.

Il aurait pu être pertinent de rajouter 2 catégories intermédiaires avec des tranches d'indices minimalistes de 25% par exemple afin d'affiner les résultats.

### 4.1.3 Influence du nombre de kilomètres hebdomadaire des coureurs

Il semblerait que les coureurs qui courent un nombre important de kilomètres par semaine ont une moindre variation des deltas de l'angle de la cheville et du centre de gravité. On peut supposer que ces coureurs acquièrent avec l'expérience des compétences pour optimiser leur foulée et économiser de l'énergie ou qu'il est plus difficile pour eux de changer leur biomécanique en passant pieds nus.

### 4.1.4 Comparaison de coureurs avec une attaque talon versus medio/avant pied dans le groupe chaussures

Nous avons observé une similitude entre le fait d'attaquer médio pied avec des chaussures et le fait de courir pieds nus quand on les compare aux deltas de valeurs chaussures – pieds nus.

Courir sur le médio pied serait un moyen de se rapprocher des comportements de modération des forces d'impacts que l'on retrouve quand on enlève les chaussures aux coureurs et qu'on les fait courir pieds nus.

## 4.2 Recommandations

Basé sur les résultats de l'étude, les recommandations à l'attention des personnes qui souhaitent avoir une foulée plus protectrice en termes de prévention des blessures, proche de la foulée pieds nus, pourraient être les suivantes :

- Augmenter la cadence
- Courir pieds nus ou avec des chaussures plus minimalistes permet de diminuer les angles du genou, de la cheville et de la pronation.
- Diminuer le bruit

## 4.3 Limites

Les limites de notre étude sont multiples. La première est la réalisation des mesures sur tapis roulant. Même si l'ensemble des coureurs nous ont déclaré déjà avoir couru sur tapis, nous sommes conscient qu'il peut exister une différence avec une foulée en extérieur. Cependant les 2 conditions de mesures ont été réalisées sur le même tapis, à vitesse constante et sans consigne.

Les mesures sur Dartfish comportent elles aussi des biais d'interprétations. Même si elles sont standardisées pour être reproductibles, on estime une erreur de l'ordre de 5° pour les mesures d'angles genoux, 2° pour les angles de la cheville et 2° pour les angles au niveau de la prono/supination. Nous avons établi ces marges d'erreur en remesurant 10 coureurs 3 fois.

L'étude a été réalisée par 1 seul kiné. Un deuxième thérapeute aurait été intéressant pour limiter le biais de mesures et d'interprétation

Certaines variables qualitatives comme le bruit qui sont, par nature, sujet à interprétation subjective. Une mesure quantitative aurait été préférable mais impossible à réaliser dans notre cas.

La mesure de la cadence à un niveau d'erreur estimé à 3 pas/min sur plusieurs essais de mesures.

## 4.4 Pistes futures

La même étude avec un échantillon plus important pourrait être envisageable afin d'améliorer la fiabilité des données. Des capteurs de force et des logiciels plus performant pourraient être utilisés pour limiter les biais.

Il serait également intéressant d'analyser l'impact des chaussures en fonction de critères propres aux chaussures comme la densité de la semelle ou la présence ou non d'anti pronateur par exemple.

Une telle étude transversale serait également à compléter avec un suivi longitudinal de coureur permettant de voir la relation entre les caractéristiques de leur foulée et la survenue de blessures ou encore par une étude des effets de la fatigue sur la foulée (pré- / post-ultra endurance par exemple).

## Conclusion :

---

On peut supposer que la chaussure exerce une influence significative sur la biomécanique de course en modifiant plusieurs paramètres par rapport à la foulée naturelle pieds nus. Notre étude confirme certaines analyses sur le sujet et va globalement dans le même sens que la littérature scientifique.

La question se pose maintenant de savoir comment conseiller les patients et les athlètes pour qu'ils trouvent une chaussure qui dégrade le moins possible leur biomécanique.

On sait maintenant que le passage vers des chaussures proches des pieds nus peut avoir la même influence que courir pieds nus. Il faut tout de même mettre en garde les coureurs qui voudraient s'aventurer trop vite vers cette transition. Elle doit se faire de manière très progressive et si possible en se faisant accompagner par un professionnel de santé spécialisé dans le domaine.

## Sources :

---

- 1- 2021 - BERMON - evolution of distance running shoes : performance, injuries, and rules
- 2- 2021 - KLIETHERMES - lower step rate is associated with a higher risk of bone stress injury : à prospective study of collegiate cross-country runners
- 3- 2021 - MUSGJERD - effect of increasing running cadence on peak impact force in an outdoor environment (“Do runners who suffer injuries have higher vertical ground ...”)
- 4- 2019 - QUINN - l'entraînement par fréquence de pas améliore l'économie de course chez les coureuses bien entraînées
- 5- BLAISE DUBOIT : La santé par la course à pied 2019 ; édition Mons
- 6- 2012 - BLAISE DUBOIT - Biomécanique de course : science, controverse et aspect pratique. Revue de la littérature scientifique - October 2012 Conference : IFOMPT, World Congress of Manual/Musculoskeletal Physiotherapy At: Quebec
- 7- LIEBERMAN, Daniel E., VENKADESAN, Madhusudhan, WERBEL, William A., et al. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners
- 8- 2015 - Jean-Francois Esculier, Blaise Dubois - A consensus definition and rating scale for minimalist shoes

# “Influence de la chaussure sur la biomécanique de course”

## Résumé :

---

La course à pied est un sport en plein essor ces dernières années, malgré les technologies toujours plus innovantes, 1 coureur sur 2 se blesse chaque année.

Au travers d’une étude sur 81 coureurs de différents niveaux, nous avons essayé de trouver des réponses à la question : « quelle est l’impact de la chaussure sur la biomécanique de course ? »

Pour cela nous avons analysé sur tapis roulant différents paramètres de la biomécanique de course chez les coureurs avec chaussures et pieds nus.

Il en ressort comme résultat, une diminution significative de la cadence, de l’angle du genou et de la distance de pose du pied par rapport au centre de gravité. La pose du pied passe d’une attaque talon à une attaque médio / avant pied. Le bruit est lui aussi nettement diminué.

Certaines caractéristiques, comme l’indice minimaliste des chaussures et le nombre de kilomètres couru par semaine peuvent dans certains cas avoir une influence sur la biomécanique de course.

On peut conclure que la chaussure exerce une réelle influence sur notre biomécanique de course. Il nous paraît important de la prendre en compte dans la prévention des blessures.

Mots clés : course à pied, trail-running, cinétique, cinématique, chaussures de course, course pieds nus