



HAL
open science

Influence des chaussures minimalistes sur le risque de blessures de sur-sollicitation du membre inférieur chez l'enfant

Alexis Herbaut, M. Roux, N. Gueguen, Franck Barbier, Emilie Simoneau-Buessinger, Pascale Chavet, M. Rozenblat

► To cite this version:

Alexis Herbaut, M. Roux, N. Gueguen, Franck Barbier, Emilie Simoneau-Buessinger, et al.. Influence des chaussures minimalistes sur le risque de blessures de sur-sollicitation du membre inférieur chez l'enfant. *Science & Sports*, 2017, 32 (3), pp.119-128. <10.1016/j.scispo.2016.07.010>. <hal-01691134>

HAL Id: hal-01691134

<https://hal.science/hal-01691134v1>

Submitted on 22 Oct 2024

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

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



HAL Authorization

Influence des chaussures minimalistes sur les risques de blessures de sur-sollicitation du membre inférieur chez l'enfant

Influence of minimalist shoes on lower-limb overuse injuries risk in children

A. Herbaut^{a,b,*}, M. Roux^b, N. Guéguen^b, F. Barbier^a,
E. Simoneau-Buessinger^a, P. Chavet^c, M. Rozenblat^d

^a UMR CNRS 8201, laboratoire d'automatique, de mécanique, et d'informatique industrielles et humaines (LAMIH), université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC), 59313 Valenciennes, France

^b SportsLab, Decathlon, 4, boulevard de Mons, 59650 Villeneuve d'Ascq, France

^c UMR CNRS 7287, institut des sciences du mouvement (ISM), Aix-Marseille université, 13009 Marseille, France

^d Centre CORALIS, 32ter, avenue du Général-Leclerc, 77330 Ozoir-La-Ferrière, France

Résumé

Objectifs. — L'objectif de cette revue était d'examiner, chez les enfants, l'influence des chaussures minimalistes sur la biomécanique de course et d'établir une analyse théorique de l'influence de ce type de chaussure sur le risque de blessure. **Actualités.** — Entre 8 et 15 ans, les stress répétés induits par la pratique sportive régulière et les poussées de croissance que connaissent les enfants sportifs les rendent enclins aux blessures de sur-sollicitation. Les plus communes pour le membre inférieur sont les maladies d'Osgood-Schlatter et de Sever. Le premier lien entre le corps et le sol étant la chaussure, cette dernière peut être de première importance concernant le risque d'apparition de ces pathologies. Il est suggéré que l'utilisation de chaussures minimalistes modifierait la biomécanique de course et donc potentiellement le risque de blessure. **Perspectives et projets.** — De futures investigations sont nécessaires pour identifier, au cours du temps, si les enfants adaptent ou non leur motricité à l'utilisation de chaussures minimalistes et si le port de ces dernières influence le risque de blessure de sur-sollicitation. **Conclusion.** — Par rapport aux chaussures conventionnelles, l'utilisation de chaussures minimalistes induit généralement un placement du pied plus à plat avec une cheville plus en flexion plantaire lors de l'impact avec le sol et une flexion du genou moins importante pendant la phase d'appui. Il semble que ces modifications conduisent à une réduction des forces de tension au niveau du genou et qu'elles pourraient diminuer le risque de maladie d'Osgood-Schlatter. Concernant la maladie de Sever, l'analyse biomécanique n'est pas concluante à cause de la complexité de sa patho-mécanique. Le port de chaussures minimalistes devrait diminuer les forces compressives sous le talon par une redistribution de la pression sur l'ensemble de la face plantaire ou sous l'avant-pied mais pourrait en contrepartie augmenter les forces de tension au niveau de l'insertion du tendon d'Achille sur le calcaneum.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : herbaut.alexis@gmail.com (A. Herbaut).

Summary

Objective. — The objective of this review was to examine the influence of minimalist shoes on the running biomechanics of children and to establish a theoretical analysis of the influence of this type of shoes on the injury risk. *News.* — Between 8 and 15 years old, repeated stress induced by the regular practice of sports and growth spurts experienced by active children make them prone to overuse injuries. The most common for the lower body are Osgood-Schlatter and Sever's disease. The first link between the body and the ground being footwear, the latter can be of primary importance in the occurrence of these pathologies. It was suggested that the use of minimalist shoes would modify the running biomechanics and thus potentially the injury risk. *Prospects and projects.* — Further investigations are needed to identify whether, over time, children adapt or not their behaviour to the use of minimalist shoes and whether the wearing of this type of shoes influences the overuse injuries risk. *Conclusion.* — Compared with conventional shoes, the use of minimalist shoes generally induces a flatter foot placement, with a more plantar-flexed ankle at ground contact and less knee flexion during stance phase. It seems that these modifications lead to a reduction of tensile forces at the knee and may decrease the risk of Osgood-Schlatter disease. Concerning Sever's disease, the biomechanical analysis was not conclusive due to the complexity of its patho-mechanics. The wearing of minimalist shoes should decrease heel compressive forces through a pressure redistribution under the whole plantar surface or under the forefoot but may in counterpart increase tensile forces at the Achilles tendon insertion site onto the calcaneus.

MOTS CLÉS

Maladie de Sever ; Apophysite calcanéenne ; Maladie d'Osgood-Schlatter ; Drop de la chaussure ; Biomécanique

KEYWORDS

Sever's disease; Calcaneal apophysitis; Osgood-Schlatter disease; Shoe drop; Biomechanics

1. Introduction

La pratique régulière d'activité physique serait bénéfique à la croissance des enfants. Cependant, tandis que les activités de faible intensité peuvent stimuler la croissance osseuse et tissulaire, les entraînements de haute intensité peuvent inhiber leur développements et engendrer de sévères blessures articulaires [1–3]. Les structures internes des enfants et des préadolescents diffèrent de celles des adultes et sont dans un processus permanent de modelage-remodelage au cours de la croissance. Ces modifications, associées à une surcharge causée par des activités de haute intensité, créent des points de faiblesse sujets à risque de blessure de sur-sollicitation [4].

L'analyse des paramètres biomécaniques est une méthode pertinente pour estimer les forces et charges éprouvées par les os, les tendons et les ligaments au cours de la locomotion et des mouvements sportifs [5]. La chaussure est considérée comme l'un des facteurs extrinsèques principaux influençant la biomécanique du membre inférieur et jouant un rôle indirect sur le risque de blessure. L'influence de la géométrie et de la composition de la semelle intermédiaire sur la cinématique et la dynamique des athlètes a été étudiée dans de nombreuses études.

Parmi tous les paramètres de la semelle, il a été montré que le drop (i.e. la différence entre la hauteur de semelle sous le talon et sous l'avant-pied) avait un effet sur la charge subie par les articulations du membre inférieur [6–9]. Par conséquent, une certaine attention a été portée au cours de ces dernières années sur les effets du port de chaussures minimalistes sur la biomécanique de course [7,8,10]. Cependant, malgré le récent engouement pour la course avec des chaussures minimalistes, la légitimité de ce type de chaussures, essentiellement évaluée chez les adultes, reste controversée. Alors que certains auteurs suggèrent des effets bénéfiques sur la réduction des blessures lors de la course à pied avec ce type de chaussures [11], d'autres ont reporté différents types de blessures pour les coureurs qui effectuaient une transition, la plupart du temps trop brutale, de l'utilisation de chaussures conventionnelles ayant beaucoup d'amorti vers des chaussures minimalistes [12–14]. Une transition soudaine de chaussures amortissantes vers des chaussures minimalistes place une surcharge sur les structures insuffisamment entraînées pour supporter celle-ci. De plus, les adultes pourraient avoir fragilisé leurs structures par un manque de sollicitation induit par l'utilisation de confortables chaussures amortissantes [15]. Cependant, les enfants ne sont pas autant habitués au

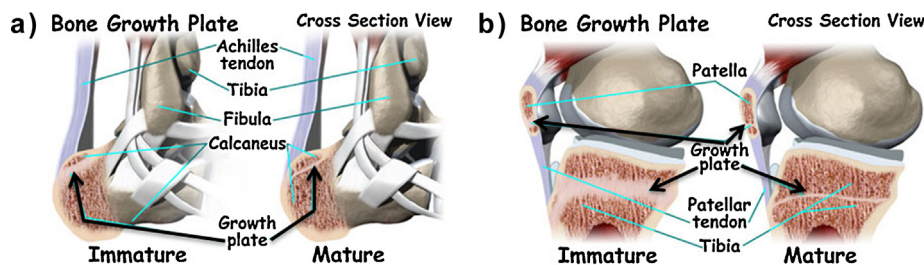


Figure 1 Vue latérale des plateaux de croissance lorsque l'os est en phase immature (à gauche) et mature (à droite) au niveau de (a) l'articulation de la cheville et (b) l'articulation du genou (images utilisées avec la permission de Medical Multimedia Group, 2015 [108]).

port de chaussures amortissantes et les effets du port de chaussures minimalistes sur l'apparition de blessures restent inconnus.

Par conséquent, cette revue a pour objectif d'analyser si le port de chaussures minimalistes pour les activités physiques serait plutôt bénéfique ou délétère par rapport au risque de blessure de sur-sollicitation chez les enfants. Elle comprend (a) une définition des principales blessures de sur-sollicitation subies par les jeunes sportifs ainsi que leurs causes physiologiques et biomécaniques, (b) une description des adaptations cinématiques et dynamiques du corps résultant de l'utilisation de chaussures minimalistes ainsi qu'une analyse biomécanique théorique de l'influence du port de telles chaussures par les enfants sur les risques de blessure de sur-sollicitation.

2. Les blessures de sur-sollicitation chez les enfants et leurs causes biomécaniques

2.1. Spécificités des enfants et épidémiologie

Le pourcentage des enfants impliqués dans les activités physiques périscolaires a augmenté au cours des dernières décennies, de quasi aucun en 1930 à environ 50 % de nos jours [5]. Par exemple, aux États-Unis d'Amérique, environ 30 à 35 millions des enfants âgés de 8 à 15 ans pratiquent régulièrement du sport dans une structure organisée [16]. De plus, les enfants sont de plus en plus impliqués dès le plus jeune âge dans d'intenses programmes d'entraînement et dans des compétitions, ce qui conduit mécaniquement à une augmentation du nombre de blessures dans cette population [17]. De même, une technique non optimale, des équipements sportifs peu adaptés, ainsi qu'une force musculaire plus faible et moins bien coordonnée placent les enfants particulièrement à risque de subir des blessures de sur-sollicitation liées à la pratique du sport [16,18], ce qui représente environ 50 % de toutes les blessures pour cette population [19].

Les blessures de sur-sollicitation surviennent quand une force est appliquée de manière répétitive sur un tissu biologique à un niveau supérieur à celui qu'il est capable de supporter [20]. La combinaison de la répétition du stress provoqué et du manque de temps de récupération cause des microlésions du tissu [21]. Il a été montré que les blessures de sur-sollicitation ou chroniques résultant de micro-traumatismes répétés étaient plus répandues que les

blessures aiguës au niveau du membre inférieur [22]. Les enfants diffèrent des adultes en termes d'anthropométrie, d'anatomie structurelle, de biomécanique et de physiologie [23]. À cause de leur squelette immature, les jeunes sportifs sont exposés à différents types de blessures par rapport aux adultes. Tandis que la structure osseuse est résistante et que les sites de blessures sont plutôt ligamentaires ou musculaires chez les adultes, les enfants sont plus susceptibles de subir des blessures au niveau des sites d'insertion des tendons et des structures osseuses environnantes [4]. L'apophyse, aussi appelée le plateau de croissance, correspond au site où le tendon s'insère sur l'os : l'enthèse. Cette zone est un point de faiblesse à cause de son modelage et remodelage constants au cours de la croissance (Fig. 1) [24] et constitue donc le site le plus commun des blessures de sur-sollicitation subies par les enfants. Pour le membre inférieur, les entheses les plus touchées sont l'insertion du tendon d'Achille et du fascia plantaire sur le calcaneum (maladie de Sever) (Fig. 1a) et l'insertion du tendon rotulien sur la tubérosité tibiale du genou (maladie d'Osgood-Schlatter) (Fig. 1b) [16,18,25,26].

2.2. La maladie de Sever

La maladie de Sever a été définie comme une inflammation de l'apophyse calcanéenne, un centre de croissance cartilagineux sur lequel s'insère le tendon d'Achille (Fig. 2) [27,28]. C'est la plus grande source de douleurs au talon ressenties par les enfants âgées de 7 à 15 ans, et plus particulièrement les jeunes garçons âgés de 10 à 12 ans et les jeunes filles de 8 à 10 ans [29]. Cette pathologie est exacerbée par la répétition d'impacts et d'accéléérations-décélération observées lors de la course, des sauts et des mouvements de changements de direction (e.g. en football, basketball ou tennis) [17]. Il a été reporté que l'incidence de la maladie de Sever représentait de 11,3 à 16,5 % des blessures chez les enfants et jusqu'à 22,7 % de toutes les ostéochondroses de croissance [30-33].

Cette pathologie a été liée à la répétition de micro-traumatismes au niveau du talon dus à la combinaison d'une traction excessive du tendon d'Achille et du fascia plantaire sur le calcaneum (forces de tension) [34] et la répétition des impacts sous le talon (forces de compression) [30,35]. À la fois les hypothèses de « traction longitudinale » et de « compression verticale » ont expliqué les épines calcanéennes chez les personnes âgées [36] et pourraient aussi expliquer la maladie de Sever, comme discuté ci-après.



Figure 2 Vue latérale au rayon-X d'un pied présentant une maladie de Sever identifiable par la fragmentation de l'apophyse calcanéenne (illustration utilisée avec la permission de Chang et al., 2013 [109]).

2.2.1. Arguments en faveur de la théorie des forces de traction

Puisque la maladie de Sever apparaît pendant la pré-adolescence, c'est-à-dire quand les enfants subissent d'importantes poussées de croissance, la principale théorie explicative donnée dans la littérature est l'hypothèse de la « traction longitudinale ». Il a été démontré que la croissance n'était pas linéaire [37] et qu'un délai existait entre le développement de l'os et celui de l'unité musculo-tendineuse. Ce délai tend à réduire la flexibilité de la jambe entre 8 et 13 ans [38], puis la force musculaire commence à augmenter. Par conséquent, les enfants doivent faire face à une tension disproportionnée répétée du tendon d'Achille, ce qui peut provoquer une inflammation au niveau de l'apophyse calcanéenne [27,29,39]. En outre, la détection de bandes fibreuses perpendiculaires au calcaneum dans le cartilage de l'apophyse calcanéenne suggère d'importants stress qui pourraient résulter d'une traction excessive [40]. De plus, la pronation excessive, qui peut être observée chez les enfants, serait un facteur de risque intrinsèque [34], engageant une déformation additionnelle des fibres du tendon d'Achille causée par la torsion [41].

2.2.2. Arguments en faveur de la théorie des forces de compression

L'une des origines de la maladie de Sever est le développement de l'arche plantaire lié à la réduction du coussinet graisseux sous la plante de pied. En effet, il a été observé que les enfants affectés par cette pathologie avaient tendance à avoir un coussinet graisseux sous le talon plus fin que les enfants sains [42]. Cependant, les précédentes études in-vitro ont révélé que l'ablation du coussinet graisseux sous le talon réduisait l'absorption du choc de 20 à 28 % [43]. D'un côté, le développement de l'arche plantaire redistribue la pression sous le talon et l'avant-pied au lieu de l'ensemble de la surface plantaire [44,45]. D'un autre côté, la réduction substantielle du coussinet graisseux sous le talon, agissant comme un mécanisme passif majeur

d'atténuation de l'impact, diminue la protection naturelle du calcaneum contre les forces compressives [46–48].

La maladie de Sever est communément observée chez les sportifs pratiquant des sports impliquant des courses et des sauts générant de nombreux impacts du pied avec le sol, comme c'est le cas au football, basketball ou tennis par exemple [31,49,50]. À notre connaissance, aucun cas de maladie de Sever n'a été reporté dans la littérature pour des sports où les impacts du pied avec le sol ne sont pas présents, comme en cyclisme ou en natation. Ogden et al. [27] ont aussi souligné que les douleurs au talon étaient peu répandues dans les sports comme le hockey sur glace ou le ski de fond où les forces d'impacts sont très faibles même si celles de traction et de cisaillement sur l'apophyse sont élevées. De plus, il a été montré que chez les jeunes souffrant d'une maladie de Sever unilatérale, le pied symptomatique supportait un plus grand pourcentage de poids de corps que le pied asymptomatique, conduisant à une pression plus importante sous le talon [51,52]. Cela suggérerait que l'impact et les forces compressives qui en résultent sont des facteurs clés dans l'étiologie de la maladie de Sever.

2.2.3. Arguments en faveur des forces de traction et de compression

La maladie de Sever a été particulièrement observée chez les enfants en surpoids. D'un côté, un poids de corps plus important cause une augmentation de la pression sur les structures sous-jacentes du talon lors de l'impact avec le sol et pendant la phase d'appui, soutenant la théorie de la « compression verticale ». D'un autre côté, un travail interne plus important est produit par le triceps surae via le tendon d'Achille afin de soulever une masse plus importante pendant la phase de poussée, soutenant la théorie de la « traction longitudinale » [53]. Par conséquent, à cause de la complexité de sa patho-mécanique, la proportion exacte des forces de traction et de compression dans l'implication d'apparition de la maladie de Sever reste inconnue et requiert d'autres investigations.

2.3. La maladie d'Osgood-Schlatter

La maladie d'Osgood-Schlatter apparaît généralement chez les enfants âgés de 10 à 15 ans pratiquant des sports comprenant de la course, des mouvements latéraux et des sauts tel que le football, le basketball, la gymnastique ou le volleyball [16,17,54,55]. Elle se manifeste par une irrégularité de l'apophyse séparée de la tubérosité tibiale au cours des premiers stades et par une fragmentation au cours des stades plus avancés (Fig. 3) [56]. Une proéminence osseuse peut aussi apparaître sur la partie haute du tibia et pourrait être particulièrement douloureuse lors de l'application d'une pression externe. Cette maladie a une prévalence de 4,5 % chez les enfants ne pratiquant pas d'activité physique et représente jusqu'à 21,2 % de toutes les blessures chez ceux pratiquant régulièrement du sport [57].

La cause exacte de cette pathologie reste inconnue mais la principale hypothèse explicative reposerait sur une traction excessive au niveau de la tubérosité tibiale causée par les contractions répétées du quadriceps [18]. Des altérations morphologiques de la patella et du tendon patellaire, une insuffisance vasculaire de l'apophyse, des altérations



Figure 3 Vue latérale au rayon-X d'un genou présentant une maladie d'Osgood-Schlatter identifiable par la fragmentation de la tubérosité tibiale (illustration utilisée avec la permission de Chang et al., 2013 [109]).

angulaires du tibia, un quadriceps raide et/ou un déséquilibre entre les fléchisseurs et les extenseurs du genou sont des facteurs ayant aussi été associés au développement de cette pathologie [58].

Sarcevic (2008) a montré que la quasi-totalité des enfants ayant une maladie d'Osgood-Schlatter présentaient une dorsiflexion limitée de la cheville (moins de 10°). Une dorsiflexion limitée de la cheville est associée à une augmentation de la flexion du genou, de la rotation tibiale interne et de la pronation du pied pendant la phase d'appui de la course à pied. Une étude a observé que 48 % des enfants ayant souffert d'une maladie de Sever développaient ensuite une maladie d'Osgood-Schlatter, ce qui est plus de 2 fois l'incidence reportée chez les adolescents pratiquant du sport [30]. Cela signifierait que plusieurs facteurs, tel qu'une dorsiflexion de la cheville limitée ou une pronation du pied excessive, seraient communs à l'apparition de ces 2 maladies.

3. Influence des chaussures minimalistes sur la biomécanique de course et implication sur le risque de blessure

Il a été démontré que la chaussure avait une influence non négligeable sur la biomécanique des sportifs, en particulier pour les jeunes ayant un squelette encore immature [59–62]. Au cours des dernières décennies, les chaussures de sport ont beaucoup évolué, intégrant de nouvelles technologies et concepts qui ont pour but de diminuer les forces d'impacts ainsi que de protéger les sportifs grâce à un meilleur amorti et une meilleure stabilisation de l'arrière-pied [63,64]. Cependant, le nombre de blessures du membre

inférieur induites par la pratique du sport reste important chaque année et, à notre connaissance, personne n'a clairement prouvé que l'utilisation de chaussures amortissantes permettait de diminuer la gravité des blessures liées à la pratique du sport [65,66].

Certains chercheurs ont suggéré ou revendiqué que les adultes courant pieds nus étaient moins susceptibles de subir des blessures de sur-sollicitation liées à l'impact, notamment parce qu'ils adoptent un patron de course avec un contact avant-pied alors que ce contact s'effectue habituellement sur l'arrière-pied en chaussures conventionnelles [15,67]. L'engouement de la course pieds nus et de l'utilisation de chaussures minimalistes, prônant un comportement plus naturel et un bénéfice potentiel sur la réduction du risque de blessures, a augmenté ces dernières années et cette thématique a été investiguée dans de nombreuses études [6–8,11,68–73]. Les chaussures minimalistes peuvent être décrites par plusieurs caractéristiques, incluant une épaisseur de semelle intermédiaire réduite, un drop plus faible voire nul, une masse plus faible, une flexibilité plus importante et l'absence de système de stabilisation du pied tels que des pièces rigides dans la semelle ou un contrefort rigide au niveau du talon [74,75].

Parmi tous les facteurs prédisposant au risque de blessure du membre inférieur, l'un des plus importants est un équipement inapproprié, spécifiquement l'utilisation de chaussures inadaptées [76–78]. Il a été montré que l'utilisation de chaussures minimalistes avait une grande influence sur la biomécanique de course des adultes, particulièrement sur le pied, et qu'elle modifiait la charge subie par les articulations de la cheville et du genou. Très peu d'investigations ont examiné l'influence de chaussures conventionnelles/minimalistes sur la biomécanique de course chez les enfants. Cependant, les études récentes ont reporté des effets similaires chez les enfants et chez les adultes [79,80]. Par conséquent, les résultats obtenus sur les adultes discutés dans l'analyse suivante sont supposés être applicables pour les enfants (Tableau 1).

3.1. Effets sur la biomécanique du pied et de la cheville

L'une des principales différences de la course pieds nus ou avec des chaussures minimalistes par rapport à la course à pied en chaussures conventionnelles est la modification de la stratégie de contact du pied avec le sol. Le passage d'un contact avec le sol avec l'arrière du pied vers un contact avec le sol avec le médio- ou l'avant-pied a été observé chez certains pratiquants de course à pied [8,73]. Cela se manifeste par un pied plus à plat et une flexion plantaire de la cheville plus prononcée lors du contact avec le sol [11,69,81–84]. Grâce à cet ajustement cinématique, les coureurs parviennent à atténuer voire éviter les impacts sur le talon. Cela pourrait être bénéfique pour diminuer le risque d'apparition de la maladie de Sever par rapport à l'hypothèse de la « compression verticale ». Cependant, il a été montré que certains adultes conservaient un patron de course arrière-pied, même avec des chaussures minimalistes. Paquette et al. [7] ont montré que 5 coureurs sur 8 (63 %) et Willson et al. [9] ont observé que 12 participants sur 17 (71 %) présentaient un patron de course similaire lors

Tableau 1 Facteurs de risques biomécaniques associés aux maladies de Sever et d'Osgood-Schlatter et effets théoriques que la course en chaussures minimalistes ou pieds nus pourrait avoir sur eux.

Blessure	Facteurs associés à la blessure d'après la littérature	Changements associés lors de la course en chaussures minimalistes ou pieds nus par rapport à la course en chaussures conventionnelles	Implication théorique	Résumé
Maladie de Sever	Augmentation des forces compressives sous le talon [1,2]	Diminution de la force de réaction du sol sous le talon et redistribution de la pression sous l'ensemble de la surface plantaire ou sous l'avant-pied [3–5] Augmentation de la force de réaction du sol sous le talon pour certains individus ne modifiant pas leur cinématique [7–9]	Diminution du risque Augmentation du risque pour certains individus	La course en chaussures minimalistes pourrait être bénéfique grâce à une réduction des forces compressives sous le talon mais délétère à cause d'une augmentation des forces de tension dans le tendon d'Achille Cependant, premièrement, il a été montré que le travail excentrique pouvait être efficace pour soigner les tendinopathies du tendon d'Achille [6]. Deuxièmement, certaines études ont montré que certains coureurs ne s'adaptent pas à l'utilisation de chaussures minimalistes, augmentant donc la pression sous le talon pour ces individus
	Augmentation des forces de tension dans le tendon d'Achille [10–12] Pronation excessive [15]	Augmentation du moment fléchisseur plantaire de la cheville et de la tension dans le tendon d'Achille [3,5,7,13,14] Diminution de l'amplitude de la pronation [16,17] ou aucune différence significative [18,19]	Augmentation du risque Diminution du risque ou aucune influence	
Maladie d'Osgood-Schlatter	Augmentation de la pression tibio-fémorale et patello-fémorale	Diminution de l'élongation du tendon patellaire, de la pression au niveau de l'articulation du genou [5,7,13,14,20]	Diminution du risque	L'utilisation de chaussures minimalistes pour la course à pied semble être bénéfique puisque cela permet de diminuer l'élongation du tendon patellaire et le stress au niveau du contact patello-fémoral grâce à la réduction du pic de flexion et de la quantité de mouvement du genou [21] De plus, la diminution de la rotation tibiale interne et du moment adducteur du genou pourrait diminuer les forces de tension dans le tendon patellaire
	Augmentation de la rotation tibiale interne	Diminution du moment en rotation du genou [17,22,23] ou aucune différence significative concernant le pic de rotation tibiale interne [18,24]	Diminution du risque ou aucune influence	

de la course avec des chaussures conventionnelles ou avec des chaussures minimalistes. Pour ces individus, l'utilisation de chaussures minimalistes pourrait être délétère parce que sans adaptation suffisante, les forces d'impact pourraient augmenter comparé à la course avec des chaussures conventionnelles [6–8,81].

Pour ceux effectuant une transition vers un patron de course avant-pied, le changement entraîne des répercussions sur la charge au niveau de la cheville. En réalité, lors d'un atterrissage avec l'avant-pied, les muscles fléchisseurs plantaires (i.e. gastrocnemii et soleus) travaillent en excentrique afin de contrôler la descente du talon. Cela induit une augmentation du stress imposé au tendon d'Achille lors d'un patron de course avant-pied comparé à un patron de course arrière-pied, ce qui pourrait être délétère par rapport à l'hypothèse de la « traction longitudinale » [7,85–88]. Cependant, même s'il semble qu'une augmentation de la charge excentrique subie par le tendon d'Achille serait responsable d'une blessure de sur-sollicitation, cela pourrait aussi avoir des effets bénéfiques. En effet, il a été montré que faire travailler les muscles du triceps surae en excentrique pouvait être un mode de traitement efficace pour soigner les tendinopathies du tendon d'Achille [89–91].

Plusieurs études ont démontré que la pronation initiale après le contact avec le sol était réduite lors de la course pieds nus par rapport à la course avec des chaussures conventionnelles [81,92,93]. De plus, dans une méta-analyse récente, Hall et al. [94] ont relevé un niveau de preuve limité indiquant que la pronation maximale était réduite lors de la course pieds nus par rapport à chaussé, mais seulement pour les pronateurs [95]. Ces résultats suggèrent que courir avec des chaussures très amortissantes augmenterait la pronation jusqu'à un niveau potentiellement excessif. Cette dernière pourrait alors créer une courbure latérale du tendon d'Achille, produisant ainsi une répartition asymétrique du stress dans celui-ci [96]. Néanmoins, il est nécessaire d'interpréter ces résultats avec précaution puisqu'il existe de nos jours de nombreux concepts dans les chaussures de running conventionnelles visant à empêcher la pronation excessive du pied, tel que les supports d'arche plantaire et les semelles intermédiaires à bi-densité de matériaux. De plus, plusieurs auteurs ont suggéré que la méthode utilisée dans les études précédentes (i.e. le positionnement de marqueurs réfléchissants sur la chaussure) ne reflétait pas le mouvement réel des os sous-jacents et conduisait à une surestimation de l'amplitude de pronation [96,97].

3.2. Effets sur la biomécanique du genou

Il a été observé que la course pieds nus ou avec des chaussures minimalistes induisait une flexion du genou plus importante lors du 1^{er} contact avec le sol mais une diminution du pic et de l'amplitude de flexion du genou au cours de la phase d'appui comparé à la course en chaussures conventionnelles [85,98]. Le moment résultant d'extension du genou est plus faible lors de la course pieds nus par rapport à la course avec chaussures conventionnelles [99]. Ainsi, la réduction du pic de force des quadriceps conduit à une diminution substantielle de 12 à 27 % du stress s'exerçant sur l'articulation du genou [98,100,101]. De plus, il a été

montré que la course pieds nus ou avec chaussures minimalistes conduisait à augmenter la fréquence de foulées [69,71,72,99]. Il a été démontré qu'une augmentation de 10 % de la fréquence de foulées lors de la course à vitesse préférentielle réduisait le travail total du genou et pouvait diminuer jusqu'à 14 % du pic de force au niveau de l'articulation du genou [102,103].

Comme il a été mentionné précédemment, les chaussures conventionnelles peuvent augmenter la pronation du pied et il a été montré que la pronation du pied était couplée à la rotation tibiale interne [104]. Une rotation tibiale interne excessive a été associée à une modification de l'alignement de la patella [96], ce qui pourrait engendrer une force de traction excessive dans le tendon patellaire au niveau de son insertion sur le tibia. De plus, Hall et al. [94] ont mis en évidence que le moment adducteur du genou était significativement réduit lors de la course pieds nus par rapport à la course avec chaussures conventionnelles. Cela suggère une réduction de la charge compressive du compartiment tibio-fémoral, ce qui pourrait diminuer les altérations dégénératives au niveau de cette zone anatomique [99,105,106]. Cependant, comme pour la pronation du pied, des précautions doivent être prises quant à l'interprétation de ces résultats puisqu'ils sont controversés. En réalité, certains auteurs n'ont trouvé aucune différence significative entre la course pieds nus et la course chaussée concernant l'amplitude de rotation tibiale interne [107].

4. Conclusion

L'analyse biomécanique de la pratique d'un sport comprenant des impacts répétés avec une paire de chaussures minimalistes a été réalisée. Il a été montré que ce type de chaussures entraînait une modification de la cinématique du membre inférieur, induisant généralement un pied plus à plat (contact médio-pied ou avant-pied) et une cheville plus en flexion plantaire lors du 1^{er} contact avec le sol, couplé à une flexion du genou moins importante pendant la phase d'appui comparé à la course avec chaussures conventionnelles. Il semble que ces modifications permettent de diminuer les forces de traction au niveau du genou et pourraient donc potentiellement réduire le risque d'apparition de la maladie d'Osgood-Schlatter chez les enfants. Concernant le risque de maladie de Sever, l'analyse biomécanique ne permet pas de conclure à cause de la complexité de la patho-mécanique de cette blessure. Le port de chaussures minimalistes devrait diminuer les forces compressives sous le talon en redistribuant la pression sur l'ensemble de la surface plantaire ou sous l'avant-pied mais pourrait en contrepartie augmenter les forces de traction au niveau de l'insertion du tendon d'Achille sur le calcaneum.

5. Perspectives

Des investigations futures sont donc nécessaires afin d'identifier le pourcentage d'enfants qui adapteraient leur cinématique au cours du temps avec l'utilisation de chaussures minimalistes sur du long terme. De plus, il serait intéressant d'examiner si un changement de stratégie d'impact de l'arrière vers l'avant du pied serait bénéfique

ou délétère par rapport au risque de blessure, notamment pour la maladie de Sever. En effet, l'adoption d'une stratégie d'impact avant-pied devrait entraîner une diminution des forces compressives sous le talon mais une augmentation des forces de traction du tendon d'Achille au niveau de son insertion sur le calcaneum. Ainsi, la comparaison du nombre de cas de maladie de Sever dans un groupe expérimental adoptant des impacts avant-pied comparé à un groupe témoin maintenant des impacts talon pourrait aider à mieux comprendre les causes de cette blessure (théorie de la « traction longitudinale » vs théorie de la « compression verticale »). Enfin, il serait pertinent d'évaluer quelles sont les modifications physiologiques conséquentes à l'adoption d'une stratégie d'impact avant-pied. Les mesures de la souplesse du membre inférieur, de la raideur du complexe musculo-tendineux de la chaîne postérieure de la jambe et/ou de la force développée par les muscles fléchisseurs plantaires de la cheville donneraient des indications précieuses visant à déterminer l'aspect bénéfique ou délétère de l'utilisation de chaussures minimalistes chez l'enfant.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Références

- [1] Booth FW, Gould EW. Effects of training and disuse on connective tissue. *Exerc Sport Sci Rev* 1975;3:83–112.
- [2] Maffulli N, Baxter-Jones AD. Common skeletal injuries in young athletes. *Sports Med* 1995;19:137–49.
- [3] Maffulli N, Longo UG, Spiezia F, Denaro V. Aetiology and prevention of injuries in elite young athletes. *Med Sport Sci* 2011;56:187–200.
- [4] Malanga GA, Ramirez-Del Toro JA. Common injuries of the foot and ankle in the child and adolescent athlete. *Phys Med Rehabil Clin N Am* 2008;19 [347-71, ix].
- [5] Hawkins D, Metheny J. Overuse injuries in youth sports: biomechanical considerations. *Med Sci Sport Exerc* 2001;33:1701–7.
- [6] Chambon N, Delattre N, Guéguen N, Berton E, Rao G. Shoe drop has opposite influence on running pattern when running overground or on a treadmill. *Eur J Appl Physiol* 2014;115:911–8.
- [7] Paquette MR, Zhang S, Baumgartner LD. Acute effects of barefoot, minimal shoes and running shoes on lower limb mechanics in rear and forefoot strike runners. *Footwear Sci* 2013;5:9–18.
- [8] Sinclair J, Greenhalgh A, Brooks D, Edmundson CJ, Hobbs SJ. The influence of barefoot and barefoot-inspired footwear on the kinetics and kinematics of running in comparison to conventional running shoes. *Footwear Sci* 2012;5:45–53.
- [9] Willson JD, Bjorhus JS, Williams DSB, Butler RJ, Porcari JP, Kernozek TW. Short-term changes in running mechanics and foot strike pattern after introduction to minimalistic footwear. *PM R* 2014;6:34–43.
- [10] Squadrone R, Rodano R, Hamill J, Preatoni E. Acute effect of different minimalist shoes on foot strike pattern and kinematics in rearfoot strikers during running. *J Sports Sci* 2014;33:1–9.
- [11] 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;463:531–5.
- [12] Giuliani J, Masini B, Alitz C, Owens BD. Barefoot-simulating footwear associated with metatarsal stress injury in 2 runners. *Orthopedics* 2011;34:e320–3, <http://dx.doi.org/10.3928/01477447-20110526-25>.
- [13] Salzler MJ, Bluman EM, Noonan S, Chiodo CP, de Asla RJ. Injuries observed in minimalist runners. *Foot Ankle Int* 2012;33:262–6, <http://dx.doi.org/10.3113/FAI.2012.0262>.
- [14] Cauthon DJ, Langer P, Coniglione TC. Minimalist shoe injuries: three case reports. *Foot (Edinb)* 2013;23:100–3.
- [15] Warburton M. Barefoot running. *SportsSci.org* 2001;5 [sportsSci.org/jour/0103/mw.htm].
- [16] Adirim TA, Cheng TL. Overview of injuries in the young athlete. *Sport Med* 2003;33:75–81.
- [17] Soprano JV, Fuchs SM. Common overuse injuries in the pediatric and adolescent athlete. *Clin Pediatr Emerg Med* 2007;8:7–14.
- [18] Cassas KJ, Cassettari-Wayhs A. Childhood and adolescent sports-related overuse injuries. *Am Fam Physician* 2006;73:1014–22.
- [19] Dalton SE. Overuse injuries in adolescent athletes. *Sport Med* 1992;13:58–70.
- [20] Hoang QB, Mortazavi M. Pediatric overuse injuries in sports. *Adv Pediatr* 2012;59:359–83.
- [21] Krivickas LS. Anatomical factors associated with overuse sports injuries. *Sport Med* 1997;24:132–46.
- [22] Bruns W, Maffulli N. Lower limb injuries in children in sports. *Clin Sports Med* 2000;19:637–62.
- [23] Mauch M, Grau S, Krauss I, Maiwald C, Horstmann T. A new approach to children's footwear based on foot type classification. *Ergonomics* 2009;52:999–1008.
- [24] Micheli LJ. The traction apophysitis. *Clin Sports Med* 1987;6:389–404.
- [25] Maffulli N, Pintore E. Intensive training in young athletes. *Br J Sports Med* 1990;24:237–9.
- [26] Lau LL, Mahadev A, Hui JH. Common lower limb sport-related overuse injuries in young athletes. *Ann Acad Med Singapore* 2008;37:315–9.
- [27] Ogden JA, Ganey TM, Hill JD, Jaakkola JI. Sever's injury: a stress fracture of the immature calcaneal metaphysis. *J Pediatr Orthop* 2004;24:488–92.
- [28] Madden CC, Mellion MB. Sever's disease and other causes of heel pain in adolescents. *Am Fam Physician* 1996;54:1995–2000.
- [29] Scharfbillig RW, Jones S, Scutter SD. Sever's disease: what does the literature really tell us? *J Am Podiatr Med Assoc* 2008;98:212–23.
- [30] Kvist MH, Heinonem OJ. Calcaneal apophysitis (Sever's disease) — a common cause of heel pain in young athletes. *Scand J Med Sci Sports* 1991;1:235–8.
- [31] Micheli LJ, Fehlandt AF. Overuse injuries to tendons and apophyses in children and adolescents. *Clin Sports Med* 1992;11:713–26.
- [32] Orava S, Puranen J. Exertion injuries in adolescent athletes. *Br J Sports Med* 1978;12:4–10.
- [33] Orava S, Virtanen K. Osteochondroses in athletes. *Br J Sports Med* 1982;16:161–8.
- [34] Hendrix CL. Calcaneal apophysitis (Sever disease). *Clin Podiatr Med Surg* 2005;22:55–62.
- [35] Bartold S. Heel pain in young athletes. *Aust Podiatr* 1993;27:103–5.
- [36] Menz HB, Zammit GV, Landorf KB, Munteanu SE. Plantar calcaneal spurs in older people: longitudinal traction or vertical compression? *J Foot Ankle Res* 2008;1:7.
- [37] Tanner JM, Whitehouse RH, Takaishi M. Standards from birth to maturity for height, weight, height velocity, and weight velocity: British children, 1965. *I. Arch Dis Child* 1966;41:454–71.

- [38] Malina RM, Bouchard C, Bar-Or O. Growth, maturation, and physical activity. *Human Kinetics* 2004.
- [39] Kibler WB, Safran M. Tennis injuries. *Med Sport Sci* 2005;48:120–37.
- [40] Liberson A, Lieberman S, Mendes DG, Shajrawi I, Ben Haim Y, Boss JH. Remodeling of the calcaneus apophysis in the growing child. *J Pediatr Orthop B* 1995;4:74–9.
- [41] Clement DB, Taunton JE, Smart GW. Achilles tendinitis and peritendinitis: etiology and treatment. *Am J Sports Med* 1984;12:179–84.
- [42] Perhamre S, Lundin F, Klässbo M, Norlin R. A heel cup improves the function of the heel pad in Sever's injury: effects on heel pad thickness, peak pressure and pain. *Scand J Med Sci Sports* 2011;22:516–22.
- [43] Paul IL, Munro MB, Abernethy PJ, Simon SR, Radin EL, Rose RM. Musculo-skeletal shock absorption: relative contribution of bone and soft tissues at various frequencies. *J Biomech* 1978;11:237–9.
- [44] Staheli LT, Chew DE, Corbett M. The longitudinal arch. *Clin Orthop* 1987;69:426–8.
- [45] Bosch K, Gerss J, Rosenbaum D. Development of healthy children's feet-nine-year results of a longitudinal investigation of plantar loading patterns. *Gait Posture* 2010;32:564–71.
- [46] Fontanella CG, Forestiero A, Carniel EL, Natali AN. Analysis of heel pad tissues mechanics at the heel strike in bare and shod conditions. *Med Eng Phys* 2013;35:441–7, <http://dx.doi.org/10.1016/j.medengphy.2012.06.008>.
- [47] De Clercq D, Aerts P, Kunnen M. The mechanical characteristics of the human heel pad during foot strike in running: an in vivo cineradiographic study. *J Biomech* 1994;27:1213–22, [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9290\(94\)90275-5](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9290(94)90275-5).
- [48] Pratt DJ. Mechanisms of shock attenuation via the lower extremity during running. *Clin Biomech* 1989;4:51–7.
- [49] Elengard T, Karlsson J, Silbernagel KG. Aspects of treatment for posterior heel pain in young athletes. *Open Access J Sport Med* 2010;1:223–32.
- [50] Micheli LJ, Ireland ML. Prevention and management of calcaneal apophysitis in children: an overuse syndrome. *J Pediatr Orthop* 1987;7:34–8.
- [51] Becerro de Bengoa Vallejo R, Losa-Iglesias ME, Rodríguez Sanz D, Prados Frutos JC, Salvadores Fuentes P, Chicharro JL. Plantar pressures in children with and without Sever's disease. *J Am Podiatr Med Assoc* 2011;101:17–24.
- [52] Becerro de Bengoa Vallejo R, Losa-Iglesias ME, Rodríguez-Sanz D. Static and dynamic plantar pressures in children with and without sever disease: a case-control study. *Phys Ther* 2014;94:818–26, <http://dx.doi.org/10.2522/ptj.20120164>.
- [53] Scharfbillig RW, Jones S, Scutter S. Sever's disease-does it effect quality of life? *Foot* 2009;19:36–43.
- [54] Wall EJ. Osgood-schlatter disease: practical treatment for a self-limiting condition. *Phys Sportsmed* 1998;26:29–34.
- [55] Gholve PA, Scher DM, Khakharia S, Widmann RF, Green DW. Osgood Schlatter syndrome. *Curr Opin Pediatr* 2007;19:44–50.
- [56] Sarcević Z. Limited ankle dorsiflexion: a predisposing factor to Morbus Osgood Schlatter? *Knee Surgery Sport Traumatol Arthrosc* 2008;16:726–8, <http://dx.doi.org/10.1007/s00167-008-0529-7>.
- [57] Kujala UM, Kvist M, Heinonen O. Osgood-Schlatter's disease in adolescent athletes. Retrospective study of incidence and duration. *Am J Sports Med* 1985;13:236–41.
- [58] de Lucena GL, dos Santos Gomes C, Guerra RO. Prevalence and associated factors of Osgood-Schlatter syndrome in a population-based sample of Brazilian adolescents. *Am J Sports Med* 2011;39:415–20.
- [59] Wegener C, Hunt AE, Vanwanseele B, Burns J, Smith RM. Effect of children's shoes on gait: a systematic review and meta-analysis. *J Foot Ankle Res* 2011;4:1–13.
- [60] Oeffinger D, Brauch B, Cranfill S, Hisle C, Wynn C, Hicks R, et al. Comparison of gait with and without shoes in children. *Gait Posture* 1999;9:95–100.
- [61] Gonzalez JC, Olaso J, Alemany S, Garrido D, Comin M, Such MJ, et al. Footwear's influence on young children's gait pattern. Cleveland, USA: Footwear Biomech. Symp; 2005. p. 45–6.
- [62] Walther M, Herold D, Sinderhauf A, Morrison R. Children sport shoes: a systematic review of current literature. *Foot Ankle Surg* 2008;14:180–9.
- [63] Divert C, Mornieux G, Freychat P, Baly L, Mayer F, Belli A. Barefoot-shod running differences: shoe or mass effect? *Int J Sports Med* 2008;29:512–8.
- [64] Braunstein B, Arampatzis A, Eysel P, Brüggemann G-P. Footwear affects the gearing at the ankle and knee joints during running. *J Biomech* 2010;43:2120–5.
- [65] Hreljac A. Impact and overuse injuries in runners. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36:845–9.
- [66] Richards CE, Magin PJ, Callister R. Is your prescription of distance running shoes evidence-based? *Br J Sports Med* 2009;43:159–62.
- [67] Goss DL, Gross MT. Relationships among self-reported shoe type, footstrike pattern, and injury incidence. *US Army Med Dep J* 2012;25–30.
- [68] Divert C, Mornieux G, Baur H, Mayer F, Belli A. Mechanical comparison of barefoot and shod running. 26. Stuttgart, New York: Thieme; 2005.
- [69] Squadrone R, Gallozzi C. Biomechanical and physiological comparison of barefoot and two shod conditions in experienced barefoot runners. *J Sports Med Phys Fitness* 2009;49:6–13.
- [70] Hamill J, Russell EM, Gruber AH, Miller R. Impact characteristics in shod and barefoot running. *Footwear Sci* 2011;3: 33–40.
- [71] Rixe JA, Gallo RA, Silvis ML. The barefoot debate: can minimalist shoes reduce running-related injuries? *Curr Sports Med Rep* 2012;11:160–5.
- [72] Giandolini M, Arnal PJ, Millet GY, Peyrot N, Samozino P, Dubois B, et al. Impact reduction during running: efficiency of simple acute interventions in recreational runners. *Eur J Appl Physiol* 2013;113:599–609.
- [73] Giandolini M, Horvais N, Farges Y, Samozino P, Morin J-B. Impact reduction through long-term intervention in recreational runners: midfoot strike pattern versus low-drop/low-heel height footwear. *Eur J Appl Physiol* 2013;113:2077–90.
- [74] Davis IS. The re-emergence of the minimal running shoe. *J Orthop Sport Phys Ther* 2014;44:775–84, <http://dx.doi.org/10.2519/jospt.2014.5521>.
- [75] Esculier J-F, Dubois B, Dionne CE, Leblond J, Roy J-S. A consensus definition and rating scale for minimalist shoes. *J Foot Ankle Res* 2015;8:42, <http://dx.doi.org/10.1186/s13047-015-0094-5>.
- [76] Johnson JH. Overuse injuries in young athletes: cause and prevention. *Strength Cond J* 2008;30:27–31.
- [77] O'Neill DB, Micheli LJ. Overuse injuries in the young athlete. *Clin Sports Med* 1988;7:591–610.
- [78] Shanmugam C, Maffulli N. Sports injuries in children. *Br Med Bull* 2008;86:33–57.
- [79] Hollander K, Riebe D, Campe S, Braumann K-M, Zech A. Effects of footwear on treadmill running biomechanics in preadolescent children. *Gait Posture* 2014;40:381–5, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.05.006>.
- [80] Mullen S, Toby EB. Adolescent runners: the effect of training shoes on running kinematics. *J Pediatr Orthop* 2013;33:453–7, <http://dx.doi.org/10.1097/BPO.0b013e31829241dc>.
- [81] De Wit B, De Clercq D, Aerts P. Biomechanical analysis of the stance phase during barefoot and shod running. *J Biomech* 2000;33:269–78.

- [82] Bishop M, Fiolkowski P, Conrad B, Brunt D, Horodyski M. Athletic footwear, leg stiffness, and running kinematics. *J Athl Train* 2006;41:387–92.
- [83] Horvais N, Samozino P. Effect of midsole geometry on foot-strike pattern and running kinematics. *Footwear Sci* 2013;5:81–9.
- [84] Sinclair J. Effects of barefoot and barefoot inspired footwear on knee and ankle loading during running. *Clin Biomech* 2014;29:395–9, <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2014.02.004>.
- [85] Perl DP, Daoud AI, Lieberman DE. Effects of footwear and strike type on running economy. *Med Sci Sport Exerc* 2012;44:1335–43.
- [86] Tam N, Astephen Wilson JL, Noakes TD, Tucker R. Barefoot running: an evaluation of current hypothesis, future research and clinical applications. *Br J Sports Med* 2014;48:349–55.
- [87] Almonroeder T, Willson JD, Kernozek TW. The effect of foot strike pattern on achilles tendon load during running. *Ann Biomed Eng* 2013;41:1758–66.
- [88] Gruber A. Mechanics and energetics of footfall patterns in running. University of Massachusetts; 2012.
- [89] Stanish WD, Rubinovich RM, Curwin S. Eccentric exercise in chronic tendinitis. *Clin Orthop Relat Res* 1986;65–8.
- [90] Jonsson P, Alfredson H, Sunding K, Fahlström M, Cook J. New regimen for eccentric calf-muscle training in patients with chronic insertional Achilles tendinopathy: results of a pilot study. *Br J Sports Med* 2008;42:746–9.
- [91] Kingma JJ, de Knikker R, Wittink HM, Takken T. Eccentric overload training in patients with chronic Achilles tendinopathy: a systematic review. *Br J Sports Med* 2007;41:e3.
- [92] Barnes A, Wheat J, Milner CE. Use of gait sandals for measuring rearfoot and shank motion during running. *Gait Posture* 2010;32:133–5, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.01.015>.
- [93] Stacoff A, Kälin X, Stüssi E. The effects of shoes on the torsion and rearfoot motion in running. *Med Sci Sports Exerc* 1991;23:482–90.
- [94] Hall JPL, Barton C, Jones PR, Morrissey D. The biomechanical differences between barefoot and shod distance running: a systematic review and preliminary meta-analysis. *Sports Med* 2013;43:1335–53, <http://dx.doi.org/10.1007/s40279-013-0084-3>.
- [95] Morley JB, Decker LM, Dierks T, Blanke D, French JA, Stergiou N. Effects of varying amounts of pronation on the medio-lateral ground reaction forces during barefoot versus shod running. *J Appl Biomech* 2010;26:205–14.
- [96] Stacoff A, Nigg BM, Reinschmidt C, van den Bogert AJ, Lundberg A. Tibiocalcaneal kinematics of barefoot versus shod running. *J Biomech* 2000;33:1387–95, [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-9290\(00\)00116-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00116-0).
- [97] Stacoff A, Reinschmidt C, Nigg BM, Van Den Bogert AJ, Lundberg A, Denoth J, et al. Effects of shoe sole construction on skeletal motion during running. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:311–9.
- [98] Bonacci J, Vicenzino B, Spratford W, Collins P. Take your shoes off to reduce patellofemoral joint stress during running. *Br J Sports Med* 2014;48:425–8.
- [99] Kerrigan DC, Franz JR, Keenan GS, Dicharry J, Della Croce U, Wilder RP. The effect of running shoes on lower extremity joint torques. *PM R* 2009;1:1058–63.
- [100] Perkins KP, Hanney WJ, Rothschild CE. The risks and benefits of running barefoot or in minimalist shoes: a systematic review. *Sports Health* 2014;6:475–80, <http://dx.doi.org/10.1177/1941738114546846>.
- [101] 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;45:2306–13.
- [102] 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;43:296–302.
- [103] Lenhart RL, Thelen DG, Wille CM, Chumanov ES, Heiderscheit BC. Increasing running step rate reduces patellofemoral joint forces. *Med Sci Sports Exerc* 2013:45.
- [104] Stergiou N, Bates BT, James SL. Asynchrony between subtalar and knee joint function during running. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:1645–55.
- [105] Bonacci J, Saunders PU, Hicks A, Rantalainen T, Vicenzino BGT, Spratford W. Running in a minimalist and lightweight shoe is not the same as running barefoot: a biomechanical study. *Br J Sports Med* 2013;47:387–92, <http://dx.doi.org/10.1136/bjsports-2012-091837>.
- [106] Keenan GS, Franz JR, Dicharry J, Della Croce U, Kerrigan DC. Lower limb joint kinetics in walking: the role of industry recommended footwear. *Gait Posture* 2011;33:350–5, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.09.019>.
- [107] Eslami M, Begon M, Farahpour N, Allard P. Forefoot-rearfoot coupling patterns and tibial internal rotation during stance phase of barefoot versus shod running. *Clin Biomech* 2007;22:74–80, <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2006.08.002>.
- [108] Medical Multimedia Group L. Sever's syndrome and Osgood-Schlatter disease; 2015 [<http://www.medicalmultimedialogroup.com/> (accessed August 20, 2015)].
- [109] Chang GH, Paz DA, Dwek JR, Chung CB. Lower extremity overuse injuries in pediatric athletes: clinical presentation, imaging findings, and treatment. *J Clin Imaging* 2013;37:836–46.