

## ARTICLE DE RECHERCHE

# Comment les chaussures conventionnelles et les pieds nus influencent les caractéristiques du pied et de la démarche chez les tout-petits

Marta Gimunová<sup>1</sup>\*, Kateřina Kolařová<sup>2</sup>‡, Tomáš Vodička<sup>1‡</sup>, Michal Bozděch<sup>1</sup>¶, Martin Zvonař<sup>1‡</sup>

**1** Département de kinésiologie, Faculté des sciences du sport, Université Masaryk, Brno, République tchèque,

**2** Centre sportif universitaire, Faculté des sciences du sport, Université Masaryk, Brno, République tchèque

✉ Ces auteurs ont contribué de manière égale à ce travail.

‡ KK, TV et MZ ont également contribué de manière égale à ce travail.

\* [gimunova@fsp.muni.cz](mailto:gimunova@fsp.muni.cz)



## Résumé

### Objectifs

Les chaussures minimalistes sont récemment devenues une alternative populaire aux chaussures conventionnelles parmi

les parents d'enfants d'âge préscolaire. Étant donné que l'effet à long terme du port habituel de chaussures sur les

Le rôle exact des chaussures dans le développement du pied reste encore incertain. L'objectif de cette étude était de comparer l'indice de voûte plantaire, l'anthropométrie dynamique du pied et les paramètres de la marche chez des enfants en bas âge qui portaient habituellement des chaussures minimalistes ou des chaussures conventionnelles depuis leurs premiers pas.

### Méthodes

30 enfants en bas âge – 15 portant habituellement des chaussures minimalistes (groupe BF) et 15 portant habituellement des chaussures conventionnelles (groupe N-BF) – ont participé à cette étude. Chaque enfant a été mesuré deux fois au cours de l'étude. La première session de collecte de données a eu lieu dans le mois qui a suivi les cinq premiers pas consécutifs sans soutien effectués par l'enfant. La deuxième session de collecte de données a eu lieu sept mois après cet événement. À chaque session de collecte de données, le jeune enfant a reçu pour instruction de marcher pieds nus à son rythme naturel sur une plateforme Emed<sup>®</sup> (Novel GmbH, Allemagne). Le logiciel Emed<sup>®</sup> a généré des données concernant l'indice de voûte plantaire, l'anthropométrie dynamique du pied, l'angle de progression du pied, la surface de contact, le temps de contact, la pression maximale et la force maximale. Le test de Wilcoxon a été utilisé pour comparer les différences entre la 1<sup>re</sup> et la 2<sup>e</sup> collecte de données. Le test U de Mann-Whitney a été utilisé pour comparer les différences entre les groupes BF et N-BF.

### Résultats

Les résultats de cette étude montrent une voûte plantaire plus haute et un angle de progression du pied plus petit dans le groupe BF. La largeur de l'avant-pied dans les groupes BF et N-BF est restée proportionnelle à la longueur du pied après sept mois de marche indépendante.

### Conclusions

Ces résultats peuvent encourager les parents et les soignants à introduire des chaussures minimalistes ou à créer un moment habituel où leur enfant peut marcher pieds nus.

## ACCÈS LIBRE

**Citation** : Gimunová M, Kolařová K, Vodička T, Bozděch M, Zvonař M (2022) Comment les chaussures minimalistes et conventionnelles affectent les caractéristiques du pied et de la démarche chez les tout-petits. PLoS ONE 17(8): e0273388. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273388>

**Rédacteur** : George Vousden, Bibliothèque publique des sciences, ROYAUME-UNI

**Reçu** : 16 mars 2021

**Accepté** : 8 août 2022

**Publié** : 23 août 2022

**Droits d'auteur** : © 2022 Gimunová et al. Il s'agit d'un article en libre accès distribué selon les termes de la [licence Creative Commons Attribution](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), qui autorise une utilisation, une distribution et une reproduction sans restriction sur tout support, à condition que l'auteur original et la source soient mentionnés.

**Déclaration relative à la disponibilité des données** : L'ensemble minimal de données sous-jacentes à l'étude est téléchargé dans les fichiers [d'informations complémentaires](#).

**Financement** : cette publication a été rédigée à l'université Masaryk dans le cadre du projet n° MUNI/AV 1196/2017 avec le soutien de la bourse de recherche universitaire spécifique, octroyée par le ministère de l'Éducation, de la Jeunesse et des Sports de la République tchèque en 2017 (MZ), et dans le cadre du projet n° TJ02000059 avec le soutien de l'Agence technologique tchèque.

République (<https://www.tacr.cz/en/>) pour les années 2019-2021 (MG). Les bailleurs de fonds n'ont joué aucun rôle dans l'élaboration de l'étude, la conception, la collecte et l'analyse des données, la décision de publier ou la préparation du manuscrit.

**Conflits d'intérêts :** Les auteurs ont déclaré qu'il n'existait aucun conflit d'intérêts.

## Introduction

Les chaussures minimalistes sont récemment devenues une alternative populaire aux chaussures conventionnelles parmi les parents d'enfants d'âge préscolaire en Europe. Dans une étude menée par Goud [1] il y a plus de trente ans, seuls 19 % des tout-petits pouvaient porter des chaussures conventionnelles de largeur moyenne, la plupart d'entre eux ayant besoin de chaussures plus larges [1]. Dans son analyse publiée quelques années plus tard, Staheli [2] a déclaré que les chaussures pour enfants devraient s'inspirer du modèle pieds nus, car le développement optimal du pied se produit dans un environnement pieds nus et que les chaussures ne devraient servir qu'à protéger contre les blessures et les infections. Aujourd'hui, les chaussures minimalistes se caractérisent par leur légèreté, l'espace suffisant qu'elles laissent aux orteils, leur souplesse et l'absence de matériau d'amorti. La marche avec des chaussures minimalistes est considérée comme similaire à la marche pieds nus, tout en offrant une surface protectrice [3].

La formation de la voûte plantaire chez les enfants est l'une des questions les plus étudiées en relation avec la marche pieds nus. On a observé que les enfants qui marchent habituellement pieds nus ont une meilleure voûte plantaire que leurs camarades qui portent des chaussures [4-6], et le port habituel de chaussures dès le plus jeune âge aurait une incidence sur la prédisposition aux pieds plats [7, 8].

Des différences dans l'anthropométrie du pied, en particulier dans la largeur de l'avant-pied, ont été observées entre les populations qui marchent habituellement pieds nus et celles qui portent des chaussures [9-11]. La largeur de la partie antérieure du pied s'est avérée plus importante lorsque l'on marche pieds nus que lorsque l'on porte des chaussures [12, 13]. Des chaussures plus légères, plus larges et plus souples semblent réduire la différence entre la largeur de l'avant-pied lorsque l'on marche pieds nus et lorsque l'on porte des chaussures [14].

Enfin, des études antérieures ont rapporté des différences dans la démarche des enfants [15-17] et des tout-petits [18] marchant pieds nus ou chaussés. Des pressions plantaires maximales plus faibles sous le talon et les régions métatarsiennes ont été observées chez les personnes habituées à marcher pieds nus par rapport à celles habituées à porter des chaussures lorsqu'elles marchent pieds nus [14].

Le pied humain a évolué pendant des millions d'années pieds nus. Cependant, dans la plupart des pays industrialisés d'aujourd'hui, marcher et courir pieds nus à l'extérieur va à l'encontre des comportements conventionnels [19], malgré les preuves d'une diminution des déformations des pieds et des orteils et d'une voûte plantaire plus haute chez les populations habituées à marcher pieds nus [4, 10]. Une étude précédente menée par Hollander et al. [9] suggère que le fait de marcher pieds nus de manière habituelle pourrait avoir une influence particulière au cours des premières étapes de la vie, lorsque le pied est en pleine croissance.

La plupart des études précédentes sur les différences de démarche entre les personnes habituées à marcher pieds nus et celles habituées à porter des chaussures conventionnelles se sont concentrées sur les enfants d'âge préscolaire et les enfants plus âgés [17]. À la connaissance des auteurs, aucune étude n'a analysé ces différences chez les tout-petits. L'objectif de cette étude était de comparer l'indice de voûte plantaire, l'anthropométrie dynamique du pied et les paramètres de démarche chez les tout-petits qui ont habituellement porté des chaussures pieds nus ou des chaussures conventionnelles dès leurs premiers pas.

## Matériel et méthodes

### Participants

Les participants ont été recrutés via une publication sur les réseaux sociaux. Les chercheurs ont contacté les personnes intéressées et leur ont fourni des informations détaillées sur le projet. Les parents/tuteurs désireux de participer avec leur enfant en bas âge et répondant aux critères d'inclusion ont été sélectionnés. Les critères d'inclusion comprenaient un développement normal, la réalisation des cinq premiers pas consécutifs de l'enfant au cours des trois dernières semaines et un âge gestationnel supérieur à 37 semaines. Trente enfants en bas âge en bonne santé, ayant réalisé leurs cinq premiers pas sans soutien au cours du premier mois, ont été inclus dans cette étude. Leurs parents ont indiqué le type de chaussures utilisées par leur enfant et le jour où celui-ci a fait ses cinq premiers pas consécutifs sans soutien. Quinze enfants en bas âge (8 filles, 7 garçons) qui portaient habituellement des chaussures pieds nus (groupe BF) et 15 enfants en bas âge (7 filles, 8 garçons) qui portaient des chaussures conventionnelles (groupe non pieds nus, groupe N-BF) ont participé à cette étude. Les critères d'exclusion comprenaient tout problème au niveau des pieds.

ou des déformations des membres inférieurs et toute blessure ou opération importante antérieure au niveau du pied ou des membres inférieurs. Les parents/tuteurs ont donné leur consentement éclairé par écrit avant la participation à l'étude. L'étude a été réalisée conformément à la Déclaration d'Helsinki et a été approuvée par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université Masaryk (EKV-2019-032, 2 septembre 2019).

### Collecte des données

Chaque enfant a participé deux fois à l'étude. La première session de collecte de données a eu lieu dans le mois qui a suivi les cinq premiers pas consécutifs sans aide effectués par le tout-petit. La deuxième session de collecte de données a eu lieu sept mois après cet événement.

À chaque collecte de données, le bambin, vêtu d'une couche et d'une combinaison, devait marcher pieds nus à son rythme naturel sur une plateforme Emed<sup>1</sup> (Novel GmbH, Allemagne ; 50 x 145 cm), intégrée dans une passerelle dense de 6 mètres de long conçue sur mesure entourant la plateforme afin d'offrir une surface de marche plane, vers un parent ou un jouet à plusieurs reprises afin d'obtenir cinq essais sur la plateforme sans changement de direction inattendu ni chute. Cinq empreintes de pied droit et cinq empreintes de pied gauche acquises par pédobarographie ont été utilisées pour une analyse plus approfondie. De plus, les parents/tuteurs des participants ont indiqué l'âge, la taille et le poids à la naissance de leur enfant. La taille et le poids des participants lors des sessions de collecte de données ont été mesurés à l'aide d'un stadiomètre et d'une balance (Seca).

Le logiciel Emed<sup>1</sup> a généré des données concernant l'indice de voûte plantaire (calculé en divisant la surface d' e du milieu du pied par la surface totale de l'avant-pied, du milieu du pied et de l'arrière-pied, également utilisé dans des études précédentes par Yalcin et al. [20] et Hollander et al. [21]) et l'anthropométrie dynamique du pied : longueur du pied (cm, longueur du pied du talon à la pointe la plus distale du talon), largeur du talon, du milieu du pied et de l'avant-pied (cm et % de la longueur du pied, distance entre les deux points les plus larges du talon, du milieu du pied et de l'avant-pied, respectivement).

L'angle de progression du pied ( $\theta$ , angle entre l'axe longitudinal du pied et l'axe vertical du pied), la surface de contact ( $\text{cm}^2$ , surface moyenne sur laquelle la pression est exercée au sein du pied total), le temps de contact (ms, durée du contact au niveau du pied), la pression maximale (kPa, pression la plus élevée au niveau du pied) et la force maximale (% de la masse corporelle, force totale la plus élevée exercée au niveau du pied ou de sa surface) ont été générés par le logiciel Emed<sup>1</sup> pour le pied total. Le temps de contact (% du processus de roulement, lorsque le contact se produit dans une zone donnée du pied) et la force maximale (% de la masse corporelle) ont été analysés au niveau du talon, du milieu du pied, de l'avant-pied et des zones médiale et latérale du pied. Les trois régions horizontales du talon, du milieu du pied et de l'avant-pied (masque standard du logiciel Emed<sup>1</sup>) ont été divisées à 33 % et 66 % de la carte d' s de pression plantaire du pied utilisée précédemment dans l'analyse de la marche [22]. Les parties médiale et latérale du pied ont été divisées par un axe longitudinal du pied passant du centre du talon au deuxième orteil.

### Analyse statistique

Une analyse non paramétrique des données a été utilisée compte tenu de la violation de la distribution normale (distribution gaussienne) dans 25,48 % de toutes les variables ( $p > 0,05$ ). Une analyse statistique non paramétrique permettant de comparer des échantillons appariés, le test de Wilcoxon, a été utilisée pour comparer les différences entre la 1<sup>re</sup> et la 2<sup>e</sup> collecte de données au sein des groupes BF et N-BF. Le test U de Mann-Whitney a été utilisé pour comparer les différences entre les groupes BF et N-BF. Un niveau alpha de 0,05 a été utilisé pour définir la signification statistique. Le logiciel SPSS Statistics (SPSS, Chicago, IL, États-Unis) a été utilisé pour l'analyse statistique.

### Résultats

Les caractéristiques des participants sont présentées dans le [tableau 1](#). Les résultats du test U de Mann-Whitney utilisé pour comparer les différences entre les groupes BF et N-BF en termes de taille

Tableau 1. Caractéristiques des participants.

		Groupe BF			Groupe N-BF			p (comparaison des groupes)
		Moyenne	SD	p (comparaison des mesures répétées)	Moyenne	SD	p (comparaison des mesures répétées)	
Longueur à la naissance (cm)		49,13	1,68		47,27	11,87		
Poids à la naissance (g)		3154,00	499,63		3463,33	499,77		
1 <sup>ère</sup> collecte de données	Âge (années)	1,21	0,12		1,21	0,41		
	Taille (cm)	76,20	2,65	0,001*	79,20	4,26	0,001	0,021*
	Masse corporelle (kg)	9,53	1,28	0,001*	10,45	1,45	0,001*	0,026*
2 <sup>e</sup> collecte de données	Âge (années)	1,87	0,28		1,76	0,33		
	Taille (cm)	84,13	3,25		85,87	3,72		0,148
	Masse corporelle (kg)	11,37	1,08		12,37	1,64		0,074

\* indique une signification statistique.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273388.t001>

et la masse corporelle, montrent des différences statistiquement significatives en termes de taille et de masse corporelle dans la 1<sup>ère</sup> collecte de données. Dans la 2<sup>e</sup> collecte de données, aucune différence statistiquement significative entre les groupes n'a été observée.

Les résultats du test de Wilcoxon, utilisé pour comparer les différences entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>e</sup> collecte de données montrent des changements statistiquement significatifs en termes de taille et de masse corporelle entre les deux collectes de données dans les deux groupes.

### Indice d'arc

La moyenne et l'écart-type de l'indice d'arcade sont présentés dans le tableau 2. Le tableau présente également les résultats de la comparaison entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>e</sup> collecte de données. Dans les deux groupes, l'indice d'arcade a diminué de manière statistiquement significative lors de la 2<sup>e</sup> collecte de données. La différence entre les 1<sup>ère</sup> et 2<sup>e</sup> collectes de données était plus importante dans le groupe BF. Les résultats de la comparaison entre les groupes BF et N-BF ne montrent aucune différence statistiquement significative.

### Anthropométrie dynamique du pied

Le tableau 3 présente les moyennes et les écarts-types de la longueur du pied et de la largeur de l'avant-pied, du milieu du pied et du talon (en cm et en % de la longueur du pied). Le tableau 3 présente également les résultats de la comparaison entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>e</sup> sessions de collecte de données et entre les groupes BF et N-BF.

Les résultats anthropométriques dynamiques du pied ne montrent aucune différence statistiquement significative entre les groupes BF et N-BF. Des changements statistiquement significatifs ont été observés au niveau de la longueur du pied, de la largeur de l'avant-pied (en cm) et de la largeur du milieu du pied (en % de la longueur du pied) dans les deux groupes lorsque les 1<sup>ère</sup> et 2<sup>e</sup> sessions de collecte de données ont été comparées au sein des groupes. Une diminution substantielle entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>e</sup> collecte de données a été observée au niveau de la largeur du milieu du pied (en % de la longueur du pied) dans le groupe BF, de même que

Tableau 2. Résultats de la comparaison de l'indice de voûte plantaire entre les groupes et les collectes de données.

		Groupe BF			Groupe N-BF			p (comparaison entre les groupes)
		Moyenne	SD	p (comparaison des mesures répétées)	Moyenne	SD	p (comparaison des mesures répétées)	
1 <sup>ère</sup> collecte de données	Indice d'arc	0,36	0,03	0,003*	0,35	0,02	0,014*	0,442
2 <sup>e</sup> collecte de données	Index des arches	0,33	0,03		0,33	0,03		0,519

\* indique une signification statistique.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273388.t002>

Tableau 3. Résultats anthropométriques dynamiques du pied comparés entre les sessions de collecte de données et entre les groupes.

		Groupe BF			Groupe N-BF			p (comparaison entre les groupes BF et N-BF)
		Moyenne	SD	p (comparaison des mesures répétées)	Moyenne	SD	p (comparaison des mesures répétées)	
1 <sup>re</sup> collecte de données	Longueur du pied (cm)	12,67	0,70	0,001	13,17	0,95	0,001*	0,097
	Largeur du talon (cm)	3,82	0,27	0,083	3,92	0,28	0,030*	0,237
	Largeur du milieu du pied (cm)	4,12	0,55	0,118	4,12	0,38	0,875	0,724
	Largeur de l'avant-pied (cm)	5,29	0,49	0,001*	5,45	0,51	0,001*	0,395
	Largeur du talon (% de la longueur du pied)	30,20	1,81	0,002*	29,79	1,44	0,125	0,468
	Largeur du milieu du pied (% de la longueur du pied)	32,51	3,66	0,002*	31,30	2,18	0,011*	0,520
	Largeur de l'avant-pied (% de la longueur du pied)	41,80	3,48	0,820	41,41	3,48	0,910	0,724
2 <sup>e</sup> collecte de données	Longueur du pied (cm)	14,27	0,73		14,72	0,88		0,198
	Largeur du talon (cm)	3,93	0,31		4,18	0,36		0,101
	Largeur du milieu du pied (cm)	3,95	0,56		4,20	0,60		0,361
	Largeur de l'avant-pied (cm)	5,89	0,36		6,11	0,42		0,171
	Largeur du talon (% de la longueur du pied)	27,54	1,72		28,51	3,07		0,724
	Largeur du milieu du pied (% de la longueur du pied)	28,14	3,87		27,66	4,12		0,756
	Largeur de l'avant-pied (% de la longueur du pied)	41,40	3,53		41,53	2,65		0,694

\* indique une signification statistique.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273388.t003>

au développement de l'indice de voûte plantaire. De plus, une diminution statistiquement significative de la largeur du talon (en % de la longueur du pied) a été observée dans le groupe BF. Une augmentation statistiquement significative de la largeur du talon (cm) a été observée dans le groupe N-BF.

### Paramètres de la démarche

Les moyennes et les écarts-types des paramètres de marche analysés pour l'ensemble du pied sont présentés dans le tableau 4. Le tableau 4 présente également les résultats de la comparaison entre la 1<sup>re</sup> et la 2<sup>e</sup> sessions de collecte de données et entre les groupes BF et N-BF.

Les résultats des paramètres de marche pour l'ensemble du pied ne montrent aucune différence statistiquement significative entre les groupes BF et N-BF. Lorsque les 1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> sessions de collecte de données ont été

Tableau 4. Résultats des paramètres de marche analysés pour l'ensemble du pied.

		Groupe BF			Groupe N-BF			p (comparaison entre les groupes BF et N-BF)
		Moyenne	SD	p (comparaison des mesures répétées)	Moyenne	SD	p (comparaison des mesures répétées)	
1 <sup>re</sup> collecte de données	Pression maximale (kPa)	157,60	41,66	0,132	145,01	32,50	0,132	0,384
	Surface de contact (cm <sup>2</sup> )	49,22	4,34	0,001*	52,31	7,09	0,001*	0,206
	Temps de contact (ms)	501,20	116,48	0,005*	514,36	94,87	0,029*	0,395
	Force maximale (en % BM)	136,31	27,21	0,015*	123,31	12,12	0,047*	0,361
	Angle de progression du pied (°)	11,77	7,18	0,036*	11,86	8,68	0,053	0,787
2 <sup>e</sup> collecte de données	Pression maximale (kPa)	193,11	75,67		164,80	43,03		0,494
	Surface de contact (cm <sup>2</sup> )	58,14	5,42		62,39	6,95		0,097
	Temps de contact (ms)	369,33	89,26		424,93	121,81		0,178
	Force maximale (en % BM)	154,21	30,77		146,50	41,18		0,310
	Angle de progression du pied (°)	7,30	4,76		7,62	6,24		0,820

\* indique une signification statistique.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273388.t004>

Comparés au sein des groupes, des changements statistiquement significatifs sont apparus au niveau de la surface de contact, de la durée de l' du contact et de la force maximale en % du poids corporel dans les deux groupes. De plus, une diminution statistiquement significative de l'angle de progression du pied a été observée dans le groupe BF.

Les moyennes et les écarts-types des paramètres de marche analysés au niveau du talon, du milieu du pied et de l'avant-pied sont présentés dans le tableau 5. Le tableau 5 présente également les résultats de la comparaison entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> session de collecte de données et entre les groupes BF et N-BF.

Les résultats concernant les paramètres de marche au niveau du talon, du milieu du pied et de l'avant-pied ne montrent aucune différence statistiquement significative entre les groupes BF et N-BF. Lorsque les 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> sessions de collecte de données ont été comparées au sein des groupes, une diminution statistiquement significative du temps de contact du talon a été observée dans le groupe BF. Lorsque les 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> sessions de collecte de données ont été comparées au sein des groupes, une diminution statistiquement significative du temps de contact a été observée au niveau du milieu du pied dans les deux groupes. Lorsque les 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> sessions de collecte de données ont été comparées au sein des groupes, une augmentation statistiquement significative de la force maximale a été observée au niveau de l'avant-pied dans les deux groupes. Un changement plus important a été observé dans le groupe N-BF.

Les moyennes et les écarts-types des paramètres de marche analysés au niveau du pied médial et latéral sont présentés dans le tableau 6. Le tableau 6 présente également les résultats de la comparaison entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> séance de collecte de données et entre les groupes BF et N-BF.

Les résultats pour les paramètres de marche au niveau du pied médial montrent une différence statistiquement significative entre les groupes BF et N-BF en termes de force maximale lors de la 2<sup>ème</sup> collecte de données. La force était plus élevée dans le groupe N-BF. Lorsque les 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> sessions de collecte de données ont été comparées au sein des groupes, aucune différence statistiquement significative n'a été observée pour le pied médial. Les résultats pour les paramètres de marche dans la partie latérale du pied ne montrent aucune différence statistiquement significative entre les groupes BF et N-BF. Lorsque les 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> sessions de collecte de données ont été comparées au sein des groupes, une diminution statistiquement significative du temps de contact a été observée dans le groupe BF et une augmentation statistiquement significative de la force maximale a été observée dans les deux groupes pour la partie latérale du pied.

## Discussion

L'objectif de cette étude était de comparer l'indice de voûte plantaire, l'anthropométrie dynamique du pied et les paramètres de marche chez des enfants en bas âge qui portaient habituellement des chaussures minimalistes ou des chaussures conventionnelles.

Tableau 5. Résultats des paramètres de marche analysés au niveau du talon, du milieu du pied et de l'avant-pied.

	Zone du pied	Variable	Groupe BF			Groupe N-BF			p (comparaison entre les groupes BF et N-BF)
			Moyenne	SD	p (comparaison des mesures répétées)	Moyenne	SD	p (comparaison des mesures répétées)	
1 <sup>ère</sup> collecte de données	Talon	Temps de contact (% ROP)	60,38	6,60	0,002	57,09	9,11	0,125	0,319
		Force maximale (en % BM)	64,21	15,24	0,125	58,10	13,70	0,069	0,373
	Moyen-pied	Temps de contact (% ROP)	77,34	5,07	0,001*	74,45	7,99	0,023*	0,443
		Force maximale (en % BM)	64,60	16,41	0,910	58,65	11,06	0,650	0,494
	Avant-pied	Temps de contact (% ROP)	90,74	4,81	0,078	89,75	6,19	0,069	0,917
		Force maximale (en % BM)	68,78	22,00	0,031	68,73	13,98	0,001*	0,724
2 <sup>ème</sup> collecte de données	Talon	Temps de contact (% ROP)	46,05	7,41		51,51	11,02		0,152
		Force maximale (en % BM)	74,69	26,31		69,61	21,56		0,494
	Moyen-pied	Temps de contact (% ROP)	63,35	7,42		67,45	10,23		0,290
		Force maximale (en % BM)	62,91	13,11		62,75	19,88		0,309
	Avant-pied	Temps de contact (% ROP)	87,44	6,81		87,04	5,50		0,917
		Force maximale (en % BM)	87,44	6,81		87,04	5,50		0,885

\* indique une signification statistique.

Tableau 6. Résultats des paramètres de marche analysés au niveau du pied médial et latéral.

	Zone du pied	Variable	Groupe BF			Groupe N-BF			p (comparaison entre les groupes BF et N-BF)
			Moyenne	SD	p (comparaison des mesures répétées)	Moyenne	SD	p (comparaison des mesures répétées)	
1 <sup>ère</sup> collecte de données	Moyen du pied	Temps de contact (% ROP)	99,61	0,48	0,272	99,73	0,35	0,695	0,913
		Force maximale (en % BM)	79,2	19,08	0,078	74,97	15,07	0,57	0,065
	Pied latéral	Temps de contact (% ROP)	92,43	4,21	0,047*	93,36	3,61	0,096	0,694
		Force maximale (en % BM)	65,55	22,14	0,012*	60,71	11,83	0,019*	0,359
2 <sup>e</sup> collecte de données	Moyen du pied	Temps de contact (% ROP)	99,37	0,92		99,6	0,47		0,303
		Force maximale (en % BM)	81,33	19,07		83,11	30,67		0,017
	latérale du pied	Temps de contact (% ROP)	87,44	6,81		87,04	5,5		0,803
		Force maximale (en % BM)	82,65	11,54		83,54	9,93		0,31

\* indique une signification statistique.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273388.t006>

depuis leurs premiers pas, car l'effet à long terme du port habituel de chaussures sur la croissance et le développement des enfants reste encore incertain [17]. Le choix des chaussures optimales pour les tout-petits et les enfants est également influencé par les tendances de la mode et le prix, en plus des questions de santé et de protection des pieds [13, 23]. Une étude précédente menée par Wolf et al. [13] montre que les chaussures ont une incidence sur le schéma de mouvement pendant la marche et qu'une conception plus fine et plus souple des chaussures contribue à réduire cet effet et rend le schéma de mouvement plus similaire à celui de la marche pieds nus. Les résultats de notre étude ont montré des différences statistiquement significatives entre les groupes BF et N-BF après sept mois de port habituel de chaussures minimalistes ou de chaussures conventionnelles en ce qui concerne la force maximale exercée sur la zone médiale de l', qui était plus élevée dans le groupe N-BF. Une augmentation de la charge sur l'avant-pied médial a été observée chez les enfants et les adultes ayant une vitesse de marche plus élevée [24, 25]. Comme aucune différence statistique n'a été observée entre les groupes en ce qui concerne le temps de contact total du pied, cette observation pourrait suggérer

arche longitudinale médiale inférieure du pied dans le groupe N-BF, car la force maximale au niveau du milieu du pied médial s'est avérée accrue chez les personnes ayant une voûte plantaire basse [26]. Bien qu'elle ne soit pas synonyme de pronation excessive du pied ( ), une diminution de l'arche longitudinale médiale peut être un indicateur de pronation du pied [27]. Les tout-petits présentant diverses blessures et problèmes de pied qui ont besoin de réduire la pronation de leur pied ou de corriger leur voûte plantaire basse peuvent tirer profit des chaussures minimalistes. Il est toutefois nécessaire de surveiller l'introduction des chaussures minimalistes chez ces groupes spécifiques d'enfants.

Sept mois d'utilisation habituelle de chaussures BF ou N-BF chez les tout-petits ont également entraîné de légères différences dans le développement de la structure du pied et de la démarche. Le développement de l'indice de voûte plantaire entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> collecte de données était plus important dans le groupe BF. Une observation similaire a été rapportée par Rao et Joseph [6] et Echarri et al. [4], qui ont suggéré que le port de chaussures pendant la petite enfance pouvait affecter le développement de la voûte plantaire longitudinale. De même, une étude précédente menée par Mat-suda et al. [5] montre que les enfants d'âge préscolaire ayant l'habitude de marcher pieds nus à la maternelle ont un meilleur développement de la voûte plantaire.

Le développement anthropométrique du pied différait entre les groupes BF et N-BF au niveau de la largeur du talon, qui a augmenté de manière statistiquement significative dans le groupe N-BF lors de la 2<sup>ème</sup> session de collecte de données. Une étude antérieure suggérait que les chaussures atténuent certains chocs et favorisent un mouvement de frappe du talon pendant la course chez les enfants [17]. Une augmentation de la pression au niveau du talon et de l'avant-pied chez les adultes qui portent habituellement des chaussures par rapport à la population pieds nus a également été observée par D'Août et al. [11]. L'augmentation de la charge sur la zone du talon pourrait expliquer l'augmentation de la largeur du talon dans le groupe N-BF. Une diminution du temps de contact du talon et de la zone latérale du pied a été observée dans le groupe BF lors de la 2<sup>ème</sup> collecte de données.

Une plus grande largeur de l'avant-pied a été observée chez les marcheurs pieds nus, tant chez les enfants que chez les adultes, dans des études précédentes [9-11]. Aucune différence de largeur de l'avant-pied n'a été observée entre le groupe BF et le groupe

Groupes N-BF chez les tout-petits participant à cette étude. Comme dans l'étude de Gould et al. [28], la largeur de l'avant-pied dans les groupes BF et N-BF est restée proportionnelle à la longueur du pied après sept mois de marche autonome. Comme la différence de largeur de l'avant-pied entre les marcheurs adultes pieds nus et non pieds nus s'est avérée plus importante chez les femmes, il a été suggéré que celles-ci sont plus vulnérables aux déformations du pied, car elles portent plus souvent que les hommes des chaussures à talons hauts ou à bout pointu, qui limitent la croissance et le mouvement naturels du pied [29]. Chez les tout-petits, les chaussures conventionnelles respectent généralement la forme naturelle du pied et ne le restreignent pas autant que les chaussures conventionnelles pour adultes.

Le développement du schéma de marche différait entre les groupes BF et N-BF en ce qui concerne l'angle de progression du pied, qui a diminué de manière statistiquement significative dans le groupe BF lors de la deuxième session de collecte de données. À l'instar de nos résultats, un angle de progression du pied plus petit était associé à une voûte plantaire plus haute dans une étude précédente menée par Twomey et McIntosh [30].

La force de cette étude est également sa faiblesse. La structure du pied et le développement de la démarche ont été analysés chez des participants qui portaient habituellement des chaussures minimalistes ou des chaussures conventionnelles. Aucune restriction n'a été imposée quant à la marque de chaussures, et les chaussures conventionnelles en particulier se caractérisaient par une grande variété de formes et de matériaux. Une limite potentielle de notre étude était que la répartition des participants dans chaque groupe était déterminée par les parents des participants. À la connaissance des auteurs, aucune étude antérieure n'a été menée sur les différences de mode de vie entre les familles dont les enfants en bas âge portent des chaussures minimalistes ou conventionnelles. Cependant, des modes de vie différents (par exemple, passer plus de temps à l'extérieur et/ou encourager l'activité physique, ce qui peut avoir une incidence sur la démarche) sont possibles, car une étude antérieure a montré que les enfants/adolescents habitués à marcher pieds nus passaient plus de temps à pratiquer une activité physique modérée à intense que ceux qui portaient habituellement des chaussures [31]. La taille de l'échantillon constitue une limite de cette étude. Le calcul de l'estimation de la taille de l'échantillon par des experts ( $d = 0,8$ ) a donné 21 participants par groupe. En raison de la pandémie de Covid-19, 30 parents/tuteurs ont accepté de participer à notre étude avec leur enfant. Une analyse de puissance post hoc basée sur la différence moyenne de l'indice de voûte plantaire entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> collecte de données dans le groupe BF montre que pour un 1- $\beta$  de 0,8, la taille de l'échantillon devrait être de 13 participants par groupe. Cependant, nous sommes conscients que les calculs post hoc de la taille de l'échantillon ne sont pas utilisés de manière conventionnelle. Une autre limite est la comparaison des résultats avec des populations pieds nus, car les chaussures pieds nus offrent toujours une surface protectrice qui peut affecter le développement du pied et de la démarche. Des études futures sur l'effet du port habituel de chaussures pieds nus pendant de nombreuses années sont nécessaires pour comprendre l'effet de ce type de chaussures sur le développement du pied de l'enfant.

## Conclusions

Cette étude a comparé l'indice de voûte plantaire, l'anthropométrie dynamique du pied et les paramètres de la marche chez des enfants en bas âge qui portaient habituellement des chaussures minimalistes ou des chaussures conventionnelles depuis leurs premiers pas. Les résultats de cette étude montrent une force maximale plus élevée sur la partie médiale du pied, ce qui pourrait être associé à une voûte plantaire médiale plus basse ou à une pronation accrue du pied pendant la marche dans le groupe N-BF. Un angle de progression du pied plus petit associé à une voûte plantaire plus haute a été observé dans le groupe BF. La largeur de l'avant-pied dans les groupes BF et N-BF est restée proportionnelle à la longueur du pied. Ces résultats pourraient encourager les parents et les personnes qui s'occupent d'enfants à leur faire porter des chaussures minimalistes ou à leur laisser passer du temps pieds nus.

## Informations complémentaires

**Fichier S1. Données issues des 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> collectes de données.**  
(PDF)

## Contributions des auteurs

**Conceptualisation :** Martin Zvonař. **Curation**

**des données :** Kateřina Kolařová. **Analyse**

**formelle :** Michal Bozdeřch.

**Acquisition de financement :** Marta Gimunová, Martin Zvonař.

**Enquête :** Marta Gimunová, Kateřina Kolařová.

**Méthodologie :** Michal Bozdeřch, Martin Zvonař.

**Administration du projet :** Marta Gimunová, Tomáš Vodička.

**Logiciel :** Tomáš Vodička.

**Rédaction – version originale :** Marta Gimunová.

**Rédaction – révision et édition :** Kateřina Kolařová, Tomáš Vodička, Michal Bozdeřch, Martin Zvonař.

## Références

1. Gould N. Chaussures ou baskets pour les tout-petits qui commencent à marcher. *Foot Ankle*. 1985 ; 6 : 105-107.
2. Staheli L. Chaussures pour enfants : une revue. *Pediatrics*. 1991 ; 88 : 371-375. PMID : [1861942](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1861942/)
3. Petersen E, Zech A, Hamache D. Marcher pieds nus ou avec des chaussures minimalistes : influence sur la démarche chez les jeunes adultes et les personnes âgées. *BMC Geriatr*. 2020 ; 20, 88. <https://doi.org/10.1186/s12877-020-1486-3> PMID : [32131748](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32131748/)
4. Echarri JJ, Forriol F. Évolution de la morphologie de la plante du pied chez 1 851 enfants congolais issus de zones urbaines et rurales, et relation entre cette évolution et le port de chaussures. *J Pediatr Orthop B*. 2003, 12 : 141–146. <https://doi.org/10.1097/01.bpb.0000049569.52224.57> PMID : [12584500](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12584500/)
5. Matsuda S, Kasuga K, Hanai T, Demura T. Une étude transversale montre que la politique de la maternelle consistant à marcher pieds nus a un effet positif sur la surface de contact de la plante des pieds. *Advances in Physical Education*. 2018 ; 8 : 295–307. <https://doi.org/10.4236/ape.2018.83026>
6. Rao UB, Joseph B. L'influence des chaussures sur la prévalence des pieds plats. Une enquête menée auprès de 2 300 enfants. *The Journal of Bone and Joint Surgery, Volume britannique*. 1992 ; 74 : 525-527. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.74B4.1624509> PMID : [1624509](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1624509/)
7. Didia BC, Omu ET, Obuoforibo AA. Utilisation de l'indice de contact de l'empreinte II pour la classification des pieds plats dans une population nigériane. *Foot Ankle*. 1987 ; 7 : 285-289. <https://doi.org/10.1177/107110078700700504> PMID : [3583162](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3583162/)
8. Sachithanandam V, Joseph B. L'influence des chaussures sur la prévalence des pieds plats. Une enquête menée auprès de 1 846 personnes ayant atteint la maturité squelettique. *The Journal of Bone and Joint Surgery, Volume britannique*. 1995 ; 77B : 254-257. PMID : [7706341](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7706341/)
9. Hollander K, de Villiers JE, Sehner S, Wegscheider K, Braumann KM, Venter R, et al. Grandir (habituellement) pieds nus influence le développement de la morphologie du pied et de la voûte plantaire chez les enfants et les adolescents. *Sci Rep*. 2017 ; 7, 8079. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07868-4> PMID : [28808276](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28808276/)
10. Hollander K, Heidt C, Van Der Zwaard B, Braumann KM, Zech A. Effets à long terme de la course et de la marche pieds nus habituelles : revue systématique. *Médecine et science dans le sport et l'exercice*. 2017 ; 49 : 752-762. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001141> PMID : [27801744](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27801744/)
11. D'Aou't K, Pataky TC, De Clercq D, Aerts P. Les effets de l'utilisation habituelle de chaussures : forme et fonction du pied chez les marcheurs pieds nus natifs. *Science de la chaussure*. 2009 ; 1 : 81-94. <https://doi.org/10.1080/19424280903386411>
12. Barisch-Fritz B, Schmeltzpfenning T, Plank C, Grau S. Déformation du pied pendant la marche : différences entre la morphologie statique et dynamique en 3D du pied en développement. *Ergonomics*. 2014 ; 57 : 921-933. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.899629> PMID : [24684680](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24684680/)
13. Wolf S, Simon J, Patikas D, Schuster W, Armbrust P, Doderlein L. Mouvement du pied dans les chaussures pour enfants : comparaison entre la marche pieds nus et la marche avec des chaussures conventionnelles et souples. *Gait Posture*. 2008 ; 27 : 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.01.005> PMID : [17353125](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17353125/)

14. Franklin S, Grey MJ, Heneghan N, Bowen L, Li FX. Pieds nus ou chaussures courantes : revue systématique des différences cinématiques, cinétiques et musculaires lors de la marche. *Gait Posture*. 2015 ; 42 : 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.05.019> PMID : 26220400
15. Cranage S, Perraton L, Bowles KA, Williams C. L'impact de la souplesse des chaussures sur la démarche, la pression et l'activité musculaire des jeunes enfants. Une revue systématique. *Journal of foot and ankle research*. 2019 ; 12, 55. <https://doi.org/10.1186/s13047-019-0365-7> PMID : 31798689
16. Lythgo N, Wilson C, Galea M. Mesures de base de la démarche et de la symétrie chez les enfants d'âge primaire et les jeunes adultes marchant pieds nus et avec des chaussures. *Gait Posture*. 2009 ; 30 : 502-506. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.07.119> PMID : 19692245
17. Wegener C, Hunt AE, Vanwanseele B, Burns J, Smith RM. Effet des chaussures pour enfants sur la démarche : revue systématique et méta-analyse. *J Foot Ankle Res*. 2011;4. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-4-3> PMID : 21244647
18. Buckland MA, Slevin CM, Hafer JF, Choate C, Kraszewski AP, et al. L'effet de la flexibilité en torsion des chaussures sur la démarche et la stabilité chez les enfants qui apprennent à marcher. *Pediatr Phys Ther*. 2014 ; 26(4) : 411-7. <https://doi.org/10.1097/PEP.0000000000000084> PMID : 25251796
19. Lieberman DE. Ce que nous pouvons apprendre de la course pieds nus : une perspective médicale évolutive. *Exercise and Sport Sciences Reviews*. 2012 ; 40 : 63-72. <https://doi.org/10.1097/JES.0b013e31824ab210> PMID : 22257937
20. Yalcin N, Esen E, Kanatli U, Yetkin H. Évaluation de la voûte plantaire médiale : comparaison entre le système de mesure dynamique de la pression plantaire et l'analyse radiographique. *Acta Orthop Traumatol Turc*. 2010 ; 44(3) : 241-5. <https://doi.org/10.3944/AOTT.2010.2233> PMID : 21088466
21. Hollander K, Stebbins J, Albertsen IM, Hamacher D, Babin K, Hacke C, et al. Indice de voûte plantaire et biomécanique de la course chez les enfants âgés de 10 à 14 ans. *Gait Posture*. 2018 ; 61 : 210-214. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.01.013> PMID : 29413786
22. Merriwether EN, Hastings MK, Bohnert KL, Hollman JH, Strube MJ, Sinacore DR. Impact de la modification de l'angle de progression du pied sur la charge plantaire chez les personnes atteintes de diabète sucré et de neuropathie périphérique. *Eduorium journal of disability and rehabilitation*, 2016 ; 2(1) : 15-23. PMID : 27991615
23. Morrison SC, Price C, McClymont J, Nester C. Big issues for small feet: developmental, biomechanical and clinical narratives on children's footwear. *J Foot Ankle Res*. 2018; 11, 39. <https://doi.org/10.1186/s13047-018-0281-2> PMID: 30002732
24. Rosenbaum D, Hautmann S, Gold M, Claes L. Effets de la vitesse de marche sur les schémas de pression plantaire et le mouvement angulaire de l'arrière-pied. *Gait Posture*. 1994 ; 2 : 191-197. [https://doi.org/10.1016/0966-6362\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0966-6362(94)90007-8)
25. Rosenbaum D, Westhues M, Bosch K. Effet des changements de vitesse de marche sur les caractéristiques de charge du pied chez les enfants atteints de ' . *Gait Posture*. 2013 ; 38 : 1058-1060. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.03.020> PMID : 23643879
26. Chuckpaiwong B, Nunley JA, Mall NA, Queen RM. Effet du type de pied sur la pression plantaire dans la chaussure pendant la marche et la course. *Gait Posture*. 2008 ; 28(3) : 405-11. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2008.01.012> PMID : 18337103
27. Lange B, Chipchase L, Evans A. Effet du bandage Low-Dye sur les pressions plantaires pendant la marche chez des sujets présentant une chute naviculaire supérieure à 10 mm. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2004 ; 34(4) : 201-9. <https://doi.org/10.2519/jospt.2004.34.4.201> PMID : 15128190
28. Gould N, Moreland M, Trevino S, Alvarez R, Fenwick J, Bach N. Croissance du pied chez les enfants âgés de un à cinq ans. *Foot & Ankle*. 1990 ; 10(4) : 211-213. <https://doi.org/10.1177/107110079001000404> PMID : 2307377
29. Shu Y, Mei Q, Fernandez J, Li Z, Feng N, Gu Y. Différence morphologique du pied entre les coureurs habitués à porter des chaussures et ceux qui ne les portent pas. *PLOS ONE*. 2015 ; 10(7) : e0131385. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131385> PMID : 26148059
30. Twomey DM, McIntosh AS. Les effets des pieds à voûte plantaire basse sur la cinématique de la marche des membres inférieurs chez les enfants. *The Foot*. 2012 ; 22 : 60-65. <https://doi.org/10.1016/j.foot.2011.11.005> PMID : 22155064
31. Aibast H, Okutoyi P, Sigei T, Adero W, Chemjor D, Ongaro N, et al. Structure et fonction du pied chez les adolescents habitués à marcher pieds nus et chaussés au Kenya, *Current Sports Medicine Reports*. 2017 ; 16 : 448–458. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000431> PMID : 29135646