



UNIL | Université de Lausanne

Institut des Sciences du Sport

Comprendre le duty factor à l'aide de régressions linéaires et d'analyses en composantes principales

Gilles Vaucher

Session d'été 2022

Faculté des sciences politiques et sociales

Directeur : Patoz Aurélien

Co-directeur : Malatesta Davide

Experte : Crettaz von Roten Fabienne

Répondant : Margas Nicolas

Défense du mémoire : 30 juin 2022

Résumé

Cette étude a été réalisée dans le but de mieux comprendre le *duty factor* (DF) qui représente le rapport entre le temps de contact au sol et le temps de foulée. Pour ce faire, les caractéristiques anthropométriques, d'entraînements et des chaussures de 115 participants ont été recueillies. Ensuite, ces participants ont été équipés de 43 capteurs réfléchissants et ont couru à trois vitesses différentes (9, 11 et 13km/h) sur un tapis instrumenté entouré de huit caméras afin de mesurer leur cinématique de course. Nous avons décidé de nous intéresser uniquement aux variables cinématiques qui ne sont ni des variables temporelles ni liées à la force verticale car le DF est lui-même une variable temporelle liée à la force verticale. Deux méthodes statistiques ont été utilisées afin d'investiguer la force du lien entre ces variables et le DF. La première, l'utilisation de modèles de régression linéaire, a permis d'identifier les variables permettant le mieux d'expliquer le DF. La seconde, l'analyse en composantes principales (ACP), a quant à elle donné la possibilité d'investiguer la dimensionalité des données et de mieux comprendre le lien entre la variance des données et le DF. Concernant les modèles de régression linéaire, l'utilisation des algorithmes de sélection *forward* et *backward* a permis de mettre en avant six variables fortement corrélées au DF afin de former un modèle final simple qui explique au mieux ce paramètre. Ainsi, ce modèle final formé des angles de pied et de genou au contact initial (CI), de la distance horizontale entre le talon et le centre de masse du pelvis au CI, de la différence d'angle entre le milieu de l'appui et le contact final pour le pied et le genou et de la taille obtient des valeurs de coefficient de détermination ajusté (R_{aj}^2) de 0.80, 0.67, 0.62 aux vitesses respectives de 9, 11 et 13km/h. Pour ce qui est des ACP, elles ont permis de montrer que les dimensions qui expliquent l'essentiel de la variance des données sont très majoritairement corrélées significativement ($P \leq 0.05$) avec le DF. Néanmoins, le lien entre la variance des données et le DF est largement plus faible que le lien illustré par le modèle de régression final. Dans les deux cas, la corrélation avec le DF diminue avec l'augmentation de la vitesse de course. Finalement, les ACP ont fait ressortir l'importance des variables cinématiques liées au pied, à la cheville et au genou lors du CI comme celles qui ont la variance la plus associée au DF. Ce résultat coïncide également avec les variables qui forment le modèle de régression final. En conclusion, il semble que le DF soit influencé par une multitude de variables. Néanmoins, les variables cinématiques, principalement celles qui concernent le pied et/ou le moment du CI, semblent être les plus reliées à celui-ci. A l'inverse, cette étude semble indiquer que les caractéristiques anthropométriques, d'entraînement et des chaussures n'influencent pas de façon majeure le DF, à l'exception de la taille.

Mots clés : Biomécanique ; course à pied ; pattern de course ; cinématique ; angles articulaires ; contact initial

Abstract

This study was conducted to better understand the duty factor (DF). This parameter corresponds to the ratio of the ground contact time and stride time. To do so, anthropometric, training, and footwear characteristics of the 115 participants were collected. Participants were equipped with 43 reflective sensors and then ran at three different speeds (9, 11 and 13km/h) on an instrumented mat surrounded by eight cameras to measure their running kinematics. Among these variables, we decided to focus only on those that are neither temporal parameters nor related to the vertical force because the DF is a temporal parameter and is related to the vertical force. Two statistical methods were used to investigate the strength of the link between these variables and DF. The first one, linear regression models, identified the variables that best explained DF. The second one, principal component analysis (PCA), provided the opportunity to investigate the dimensionality of the data and to better understand the relationship between the variance of the data and the DF. Concerning the linear regression models, the use of forward and backward selection algorithms regrouped six variables strongly correlated to the DF to form a simple final model that best explains this parameter. Thus, this final model formed from the foot and knee angles at initial contact (IC), the horizontal distance between the heel and the pelvis center of mass at IC, the difference in angle between the midpoint of stance and final contact for the foot and knee, and the height obtains Pearson's adjusted coefficient values (R_{aj}^2) representative of its quality of 0.80, 0.67, 0.62 at speeds of 9, 11 and 13km/h, respectively. As for the PCAs, they showed that the dimensions that explained most of the variance in the data were overwhelmingly significantly correlated ($P \leq 0.05$) with the DF. Nonetheless, the relationship between the variance in the data and DF was largely weaker than the relationship illustrated by the final regression model and also decreased with increasing running speed. Finally, PCAs highlighted the importance of kinematic (spatial and angular) variables related to the foot, ankle, and knee during the initial IC as those with the most variance associated with DF. This result also coincides with the variables that form the final regression model. In conclusion, it appears that DF is influenced by a multitude of variables. Nevertheless, the kinematic variables, mainly those concerning the foot and/or the timing of the IC, seem to be the most related to it. Conversely, this study suggests that anthropometric, training, and footwear characteristics do not play a major role in DF, except the height.

Keywords: Biomechanics; running; running pattern; kinematic; joint angles; initial contact

Liste des abréviations

ACP : Analyse en composantes principales

CDM : Centre de masse

CI : Contact initial

CF : Contact final

CP : Composante principale

DF : Duty factor

F_y : Force horizontale

F_z : Force verticale

KMO : Kaiser-Meyer-Olkin

MA : Milieu de l'appui

MSA : Measure of sampling adequacy

t_c : Temps de contact

t_v : Temps de vol

t_f : Temps de foulée

VIF : Facteur d'inflation de la variance

$d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$: Distance horizontale entre le marqueur du talon et le centre de masse du pelvis au contact initial

$h_{\text{Pelvis}}^{\text{CI}}$: Hauteur du centre de masse du pelvis au contact initial

r : Coefficient de Pearson

R_{aj}^2 : Coefficient de détermination ajusté

θ : Angle

$\Delta\theta$: Différence d'angle

1. Introduction

La course à pied est un sport très populaire. En 2020, 27% de la population suisse disait pratiquer cette même activité et 10% en tant que sport principal (Lamprecht et coll. 2020). Cependant, le pattern de course est très variable d'un individu à l'autre (Bonnaerens et coll. 2021). Dès 1985, il a été suggéré que le pattern de course soit multifactoriel et donc influencé par une grande quantité de caractéristiques individuelles (Subotnick, 1985). Ainsi, il semblerait que les individus adoptent le style de course le plus adapté à eux-mêmes que ceux-ci soient des coureurs récréatifs ou entraînés (Patoz et coll. 2020). Il existerait donc autant de manières de courir que de personnes. En partant du constat que le pattern de course est lié aux caractéristiques individuelles, serait-il tout de même possible de prédire la foulée en analysant un même groupe de variables liées à ces caractéristiques individuelles ?

Afin de tenter de répondre à cette question, nous avons choisi de nous intéresser au *duty factor* (DF), une variable suggérée comme permettant de définir la foulée de façon plus globale (Lussiana et coll. 2019 ; Patoz et coll. 2020 ; Fihl et Moselund, 2007). Le DF se définit comme le rapport entre le temps de contact avec le sol (t_c) et le temps total de la foulée (t_f) (Eq. 1) (Alexander, 1980) :

$$DF = \frac{t_c}{t_f}. \quad (1)$$

Le DF est lié à la force de réaction au sol verticale (Beck et coll. 2020) et sa valeur est un bon prédicteur de la force verticale maximale ($R^2 = 0.76$) mais aussi du pic de force de freinage horizontale ($R^2 = 0.43$) (Bonnaerens et coll. 2021). Pour un intervalle de vitesse de course allant de 10 à 12 km/h, le DF s'avère montrer une grande variabilité individuelle avec des valeurs allant de 25% et 40% (Folland et coll. 2017). De plus, comme le laissait penser sa grande variabilité, Fihl et Moselund (2007) ont montré que celui-ci joue un rôle important dans le style de course des individus. Chez les coureurs qui courent à des vitesses de course lentes (<9.36 km/h), Bonnaerens et collaborateurs (2021) ont montré que le DF est compris entre 42.5% et 56.5%. Ainsi, même à basse vitesse, la fourchette de valeurs du DF reste large et donc indirectement, les styles de course conservent une grande hétérogénéité. Cette forte variabilité interindividuelle ajoute de l'importance au choix du DF comme variable dépendante pour cette étude. La variabilité du DF permet également de donner du sens à l'observation de son éventuel lien avec des variables anthropométriques et d'autres variables biomécaniques de la course.

Lussiana et collaborateurs (2019) ont profité de ce grand éventail de valeurs du DF pour catégoriser les coureurs en deux groupes distincts (DF élevé et DF bas). Malgré qu'il soit possible de former des groupes à partir du DF, il est important de rappeler que ses valeurs se situent sur un continuum. Néanmoins, on peut mentionner qu'un DF élevé est synonyme d'une réduction du travail contre la gravité et de la promotion du déplacement horizontal en limitant le temps de vol (t_v) et en favorisant un t_c plus long. A l'inverse, un coureur avec un DF bas favorisera un t_c plus court et t_v plus long (Lussiana et coll. 2019). De plus, quelle que soit la vitesse, les coureurs avec un DF bas présentent un style de course plus symétrique entre les phases de freinage et de propulsion en termes de temps et de déplacement vertical du centre de masse (CDM) que les coureurs avec un DF élevé (Lussiana et coll. 2019). Malgré ces différences dans le pattern de course, il semblerait que le coût énergétique ne soit pas influencé par le DF (Lussiana et coll. 2019). Bien que les individus aient leur propre DF préférentiel, celui-ci est susceptible d'être modifié naturellement en fonction de l'évolution de la vitesse de course. En effet, avec l'augmentation de cette dernière, Minetti (1998) a montré que le DF diminue. Le travail de Brughelli et collaborateurs (2011) confirme cette analyse en montrant une diminution du t_c ainsi qu'une augmentation du t_v lorsque la vitesse augmente. Ainsi, les différences interindividuelles au niveau du DF tendent à diminuer avec l'augmentation de la vitesse de course car on observe une plus forte diminution du DF chez les individus ayant un DF élevé que ceux ayant un DF bas (Lussiana et coll. 2019).

Le DF a également été mis en lien avec la classification « terrien et aérien » issue de l'échelle Volodalen. Cette échelle est basée sur l'observation subjective de cinq critères [oscillation verticale de la tête, déplacement horizontal maximal de l'articulation du coude (déplacement coude), position verticale du CDM du pelvis au moment du contact initial ($h_{\text{Pelvis}}^{\text{CI}}$), distance horizontale entre le talon et le CDM du pelvis au contact initial ($d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$), et style de pose de pied, i.e., angle du pied par rapport au sol au contact initial ($\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$)]. A l'issue de l'évaluation de ces cinq critères (score allant de 1 à 5), si un sujet a un score inférieur ou égal à 15, il sera qualifié de coureur terrien alors que s'il obtient un score supérieur à 15, il sera qualifié de coureur aérien (Gindre et coll. 2015). Par la suite, ces mêmes auteurs ont comparé les groupes terrien et aérien aux groupes DF élevé et DF bas et ont obtenu des groupes composés des mêmes individus dans 79.8% des cas (Patoz et coll. 2019). Ce résultat semble indiquer que le DF joue un grand rôle dans le style de foulée adopté par un individu, ceci au point que l'on puisse l'estimer indirectement en se focalisant sur certains critères visuels. De plus, cette dernière

étude laisse penser qu'il peut exister un lien objectif entre certaines variables biomécaniques, notamment celles de l'échelle Volodalen et le DF, sans pour autant utiliser une catégorisation par groupes. Nous allons donc essayer, en nous basant sur des variables anthropométriques, cinématiques (spatiales et angulaires), et caractérisant l'entraînement et les chaussures des coureurs, d'expliquer le DF des individus.

Il est important de préciser que les variables que nous avons sélectionnées pour observer le rôle qu'elles jouent sur le DF ne sont pas liées à des paramètres temporels ni à la force verticale. En effet, la force verticale est directement liée au DF (Beck, 2020) et le DF est lui-même un paramètre temporel. Ainsi, il n'y aurait donc pas de réel apport à investiguer le lien de ces deux types de variables avec le DF. Cependant, au-delà d'un intérêt au niveau de la pertinence de l'étude, le véritable atout d'éviter le lien entre la force verticale et les variables choisies est qu'une plateforme de force n'est pas toujours disponible pour effectuer une analyse biomécanique du pattern de course. Ainsi, tout comme précédemment indirectement effectué avec les critères d'observation de l'échelle Volodalen (Patoz et coll. 2019), nous souhaitons étudier la possibilité de proposer une évaluation alternative du DF en s'intéressant à l'influence de certaines variables facilement mesurables sur le terrain avec les coureurs.

Au regard des études ayant été réalisées dans le domaine de la biomécanique de la course à pied, nous pensons qu'un certain nombre de variables sont susceptibles d'influencer le DF (Figure 1). L'influence du style de pose de pied sur le t_c , qui est directement lié au DF, a été montré par Di Michele et Merni (2014). Patoz et collaborateurs (2020) ont eux aussi montré l'influence du style de pose de pied sur le DF. En effet, plus l'angle de pied au contact initial (CI) est petit (voir p.15, Figure 4), plus le DF est bas. De plus, si l'attaque du pied se fait par le talon ou l'arrière du milieu du pied, le DF est élevé. En outre, le style de pose de pied fait également partie de l'échelle Volodalen décrite précédemment. Les angles de genou et de hanche au milieu de l'appui (MA) influencent possiblement le DF. En effet, il a été montré que la flexion des membres inférieurs était plus grande chez les individus possédant un DF élevé que pour ceux ayant un DF bas durant le t_c (Patoz et coll. 2020). Il a aussi été montré que l'augmentation de l'âge engendre une diminution du t_v et de l'oscillation verticale (Cavagna et coll. 2008), ces paramètres étant directement liés au DF, il est probable que l'âge ait un rôle à jouer sur le DF. Les variables de l'échelle Volodalen que nous pouvons conserver (non-relées à la force verticale : déplacement coude, $h_{\text{Pelvis}}^{\text{CI}}$, $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$, $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$) ont de fortes chances d'être reliées au DF si on se base sur l'adéquation de 79.8% entre les groupes formés grâce à cette

échelle et les groupes basés sur la valeur de DF (Patoz et coll. 2019). Finalement, le matériel peut lui avoir un effet sur le DF. En effet, Chambon et collaborateurs (2014) ont montré que plus la semelle intermédiaire d'une chaussure est fine moins le t_c sera important et inversement. De plus, Firminger et Edwards (2016) ont montré un raccourcissement de la longueur de la foulée si l'épaisseur de la semelle diminue et inversement, ce qui implique une augmentation de la fréquence de pas pour maintenir une même vitesse. Gray et collaborateurs (2019) ont montré que si la fréquence de pas augmente, le DF diminue. Ainsi, si on lie ces différentes études, on peut faire l'hypothèse qu'un lien entre l'épaisseur de la semelle des chaussures et le DF est possible, et donc que les caractéristiques des chaussures sont susceptibles d'influencer le DF. Enfin, nous allons également nous intéresser aux données d'entraînement car Patoz et collaborateurs (2019) ont montré un lien entre le temps et la distance d'entraînement hebdomadaire et le groupe DF (bas/élevé) attribué au sujet.

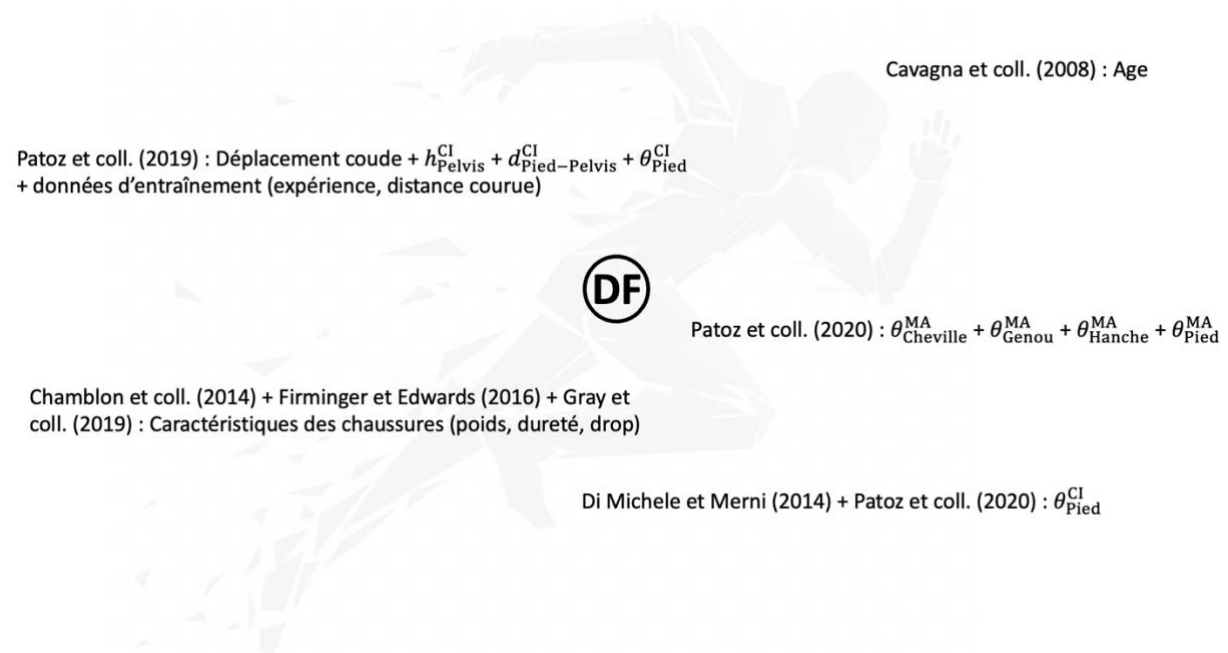


Figure 1. Variables susceptibles d'être liées au *duty factor* (DF) et leurs références. Les angles correspondant à l'articulation de la hanche, du genou, de la cheville et du pied par rapport au sol sont notés au contact initial (θ_i^{CI} : i = Pied, Cheville, Genou, Hanche), et au milieu d'appui (θ_i^{MA}). $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ correspond à la distance horizontale entre le pied et le pelvis au moment du CI. $h_{\text{Pelvis}}^{\text{CI}}$ correspond à la hauteur du centre de masse du pelvis au moment du CI. Déplacement du coude représente la distance horizontale maximale parcourue par l'articulation du coude. Dureté chaussure correspond à la dureté de la semelle. Drop chaussure correspond à la différence d'épaisseur entre l'arrière et l'avant de la chaussure. Expérience correspond au nombre d'années de pratique de la course à pied du sujet. Distance courue correspond à la distance hebdomadaire moyenne courue par le sujet.

Dans le paragraphe précédent, des variables dont le lien avec le DF a déjà été étudié ont été présentées. Néanmoins, notre sélection de variables est plus large et permettra peut-être de découvrir des relations importantes entre le DF et d'autres variables mais surtout de s'intéresser à l'influence d'un groupe de variables sur le DF. Ainsi, afin de tenter de mettre en évidence un

éventuel lien entre les variables que nous avons sélectionnées et le DF, nous allons utiliser deux méthodes statistiques, les modèles de régression linéaire et l'analyse en composante principale (ACP).

Nous allons créer des modèles de régression linéaire dans le but d'expliquer au mieux et le plus simplement possible le DF à partir d'un certain nombre de variables. L'explication du DF grâce à l'utilisation de modèles de régression est une démarche qui a déjà été utilisée par le passé. En effet, Gray et collaborateurs (2019) ont proposé des équations de régression quadratique pour prédire la cadence de course et le DF uniquement en fonction de la vitesse. Patoz et collaborateurs (2021) ont eux aussi utilisé des modèles de régression pour prédire le DF en fonction de la vitesse mais en y ajoutant d'autres facteurs (pattern de course, données d'entraînement, caractéristiques anthropométriques). Ainsi, la démarche suivie dans notre étude s'inscrit dans la lignée de ces travaux, bien que celle-ci se différencie dans la manière de sélectionner les variables formant les modèles de régression mais surtout car nous essayons non pas de prédire le DF selon la vitesse de course mais de prédire le DF à partir d'un même groupe de variables à toutes les vitesses. Néanmoins, afin d'aller plus loin dans la compréhension de l'interaction entre nos variables et le DF, l'utilisation de modèles de régression linéaire ne sera pas l'unique méthode statistique utilisée dans cette étude et se verra complétée par l'utilisation de l'ACP.

L'ACP est une technique exploratoire qui a montré de bons résultats pour repérer des variables biomécaniques importantes dans la foulée (Osis et coll. 2014). L'ACP est une technique statistique multivariée classique utilisée pour la réduction des dimensions du mouvement humain (Deluzio et coll. 1997). Tout en réduisant la dimensionnalité des données, l'ACP permet de conserver le maximum de variance contenue dans celles-ci. Cette réduction est faite en identifiant les directions, appelées composantes principales (CP), le long desquelles la variance des données est maximale. Ces CP sont de nouvelles variables formées grâce aux combinaisons linéaires des variables originales. Ainsi, seulement quelques composantes peuvent suffire à représenter les valeurs d'un bien plus grand nombre de variables. La direction de la première CP permet de maximiser la variance des données. La seconde CP est orientée dans une direction non corrélée à la première CP et cherche également à maximiser le reste de la variance des données (moins importante que pour la CP1). Cette logique est là-même pour toutes les CP suivantes. Les CP étant donc non-corrélées entre elles, elles représentent des aspects différents de l'échantillon (Ringnér, 2008 ; Robertson et coll. 2014). Pour interpréter les CP, nous

utiliserons le score des variables. Ces scores expriment le poids des variables dans chaque CP (Abdi et Williams, 2010). Par conséquent, ils permettront peut-être de mieux comprendre les directions représentées par les CP qui possèdent une variance expliquée grandement corrélée avec le DF. En effet, nous réussirons peut-être à identifier des groupes de variables ou des variables seules montrant régulièrement des scores importants, ou au contraire très faible, dans les CP qui affichent les plus grandes corrélations avec le DF et un maximum de variance expliquée dans les données.

Ainsi, nous pourrions profiter des résultats de nos deux modèles statistiques pour comparer les résultats trouvés, mais aussi utiliser les résultats de la régression linéaire pour former des ACP. En effet, à la différence des modèles de régression linéaire qui permettent principalement de maximiser la corrélation entre des variables indépendantes et la variable dépendante, l'ACP permet quant à elle d'explorer la dimensionnalité des données et d'observer la proportion de variance expliquée par les CP. Ainsi, on peut aller plus loin que la simple corrélation en analysant trois éléments en parallèles afin de déterminer quelles sont les variables qui expliquent le mieux la variabilité du DF : la variance expliquée par la CP, la corrélation de la CP avec le DF, le score des variables. Plus la variance expliquée par la CP est importante, plus les variables qui la composent et qui possèdent des scores importants expliquent la variabilité des données. Plus la corrélation de la CP avec le DF est importante, plus la variabilité contenue dans cette CP peut être associée au DF. Ainsi, il est crucial d'analyser le poids (score) des variables présentes dans les CP qui sont fortement corrélées au DF et qui expliquent une grande quantité de variance. En effet, c'est dans ce type de CP que l'on trouvera les variables qui expliquent le plus la variabilité du DF.

La première de ces deux méthodes statistiques, l'utilisation de modèle de régression linéaire, nous permettra de poursuivre notre premier but, à savoir d'identifier les variables anthropométriques, cinématiques (spatiales et angulaires), liées à l'entraînements et aux chaussures des coureurs qui permettent de mieux expliquer le DF. Parmi les variables que nous avons sélectionnées, nous émettons l'hypothèse que les variables suivantes auront le plus grand rôle à jouer dans le DF : l'angle de pied par rapport au sol au CI, la position verticale du CDM du pelvis au CI, la distance horizontale entre le CDM du pelvis et le talon au CI, l'âge et l'angle du genou et de la hanche au MA.

Notre deuxième but sera, grâce à l'utilisation de l'ACP, d'observer si une part non négligeable de la variance expliquée des données est corrélée au DF et quels sont les groupes de variables correspondant. L'utilisation de l'ACP pour investiguer la variance des données et la mettre en lien avec le DF est quelque chose de nouveau, ainsi nous n'allons pas formuler d'hypothèse mais nous inscrire dans une démarche exploratoire.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Participants

Au total, 115 sujets ont participé à l'étude dont 87 hommes (moyenne \pm écart-type ; âge : 30.2 ± 7.7 années, taille : 180 ± 6 cm, masse corporelle : 70.1 ± 6.9 kg, drop des chaussures : 7.3 ± 3.1 mm, dureté (shore) des chaussures : 54.6 ± 6.9 , distance courue par semaine : 38 ± 24 km), et 28 femmes (âge : 29.9 ± 7.0 années, taille : 169 ± 5 cm, masse corporelle : 60.8 ± 5.8 kg, drop des chaussures : 7.4 ± 3.1 mm, dureté (shore) des chaussures : 54.5 ± 7.0 , distance courue par semaine : 22 ± 16 km). Les participants ne devaient pas avoir contracté de blessures traumatiques moins d'un mois avant le début de l'expérience. De plus, différents critères d'inclusions ont été ajoutés, à savoir un âge entre 18 et 45 ans, au moins un entraînement en course à pied par semaine et une vitesse maximale aérobie estimée ≥ 14 km/h. Cette recherche a été réalisée en accord avec le protocole, la déclaration d'Helsinki, les principes de Bonne Pratique Clinique, les lois sur la recherche humaine (HRA) et l'ordonnance relative à la recherche sur l'être humain à l'exception des essais cliniques (HRO) et elle a été acceptée par la commission d'éthique de l'état de Vaud (CER-VD 2020-00334). Après avoir été informé des procédures de l'étude, chaque participant a donné son consentement par écrit.

2.2. Déroulement expérimental

Après avoir récolté les données anthropométriques, les participants ont été équipés de 43 marqueurs réfléchissants (12.5 mm de diamètre) sur leur peau et chaussures en utilisant du scotch double face, dans le but de modéliser leur biomécanique de course (Figure 2). Pour chaque participant, un essai statique de 1 s a d'abord été enregistré alors qu'il ou elle se tenait dans une position anatomique standard sur un tapis roulant instrumenté (Arsalis T150-FMT-MED, Louvain-la-Neuvre, Belgique) à des fins de calibration.

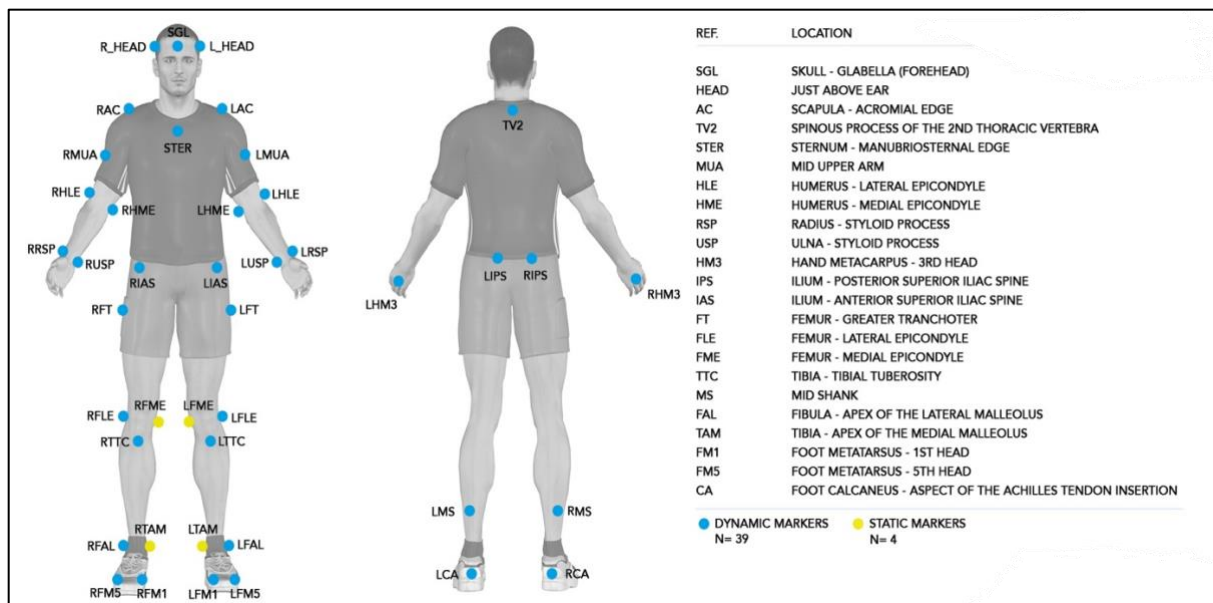


Figure 2. Illustration et localisation des 43 marqueurs nécessaires à la modélisation de la biomécanique de course.

Ensuite, un échauffement de 5 min a été effectué sur le tapis instrumenté. Durant ce laps de temps, le participant était libre de moduler sa vitesse entre 9 et 13 km/h. A la suite de l'échauffement, chaque participant a effectué trois courses de 1 min sur ce même tapis instrumenté (9, 11 et 13 km/h). L'ordre des courses a été randomisé. Les données cinétique et cinématique tridimensionnelles (3D) ont été enregistrées lors de la calibration statique et durant les 30 dernières secondes de chaque course (83 ± 5 pas), représentant plus de 20 pas par essai (Rizati et coll, 2019).

Huit caméras infrarouges (Vicon Nexus 2x, Oxford, UK) disposées autour du tapis instrumenté ont permis d'enregistrer la cinématique 3D du corps entier. Les données issues de ce dispositif ont été collectées à une fréquence de 200 Hz. De plus, les données 3D cinétique synchronisées ont été collectées à 1000 Hz en utilisant la plateforme incluse dans le tapis de course. Le système de coordonnées du laboratoire était orienté afin que les axes x , y et z représentent respectivement les axes médio-latéral (pointant vers le côté droit du corps), postérieur-anérieur et inférieur-supérieur.

Les données des marqueurs 3D et de la force de réaction au sol (signal analogique) ont été exportées au format .c3d et traitées dans le logiciel Visual3D Professional v6.01.12 (C-Motion Inc., Germantown, MD, USA). Les données des marqueurs 3D ont été interpolées à l'aide d'un algorithme d'ajustement des moindres carrés polynomiaux du troisième ordre, permettant un maximum de 20 images pour le remplissage des espaces. Elles ont ensuite été filtrées à l'aide

d'un filtre Butterworth passe-bas à 20 Hz. Le signal de la force de réaction au sol en 3D a été filtré à l'aide du même filtre, puis sous-échantillonné à 200 Hz pour correspondre à la fréquence d'échantillonnage des données des marqueurs.

À partir de l'ensemble des marqueurs, un modèle biomécanique du corps entier avec 6 degrés de liberté à chaque articulation et 15 segments rigides a été construit. Les segments comprenaient la tête, les bras supérieurs, les bras inférieurs, les mains, le thorax, le bassin, les cuisses, les jambes et les pieds. Dans Visual3D, les segments ont été traités comme des objets géométriques avec des propriétés inertielles et des emplacements de CDM en fonction de leur forme, et on leur a attribué des masses relatives en fonction d'équations de régression standard (Hanavan, 1964 ; Dempster, 1955). L'emplacement du CDM du corps entier a été calculé à partir des paramètres des 15 segments (le CDM du corps entier était directement fourni par Visual3D). Pour toutes les mesures biomécaniques et pour chaque participant, les 30 s de données collectées ont pris en compte les pas à droite et à gauche et ont été moyennées pour les analyses statistiques ultérieures.

2.3. Paramètres biomécaniques de la course

Les forces verticale (F_z ; Figure 3A) et antéro-postérieure (F_y ; Figure 3B) enregistrées à l'aide du tapis instrumenté ont permis de définir les événements spécifiques de la foulée. Le CI et le contact final (CF), qui correspondent respectivement aux instants lors desquels le pied touche et quitte le sol, ont été déterminés sur la base du niveau de seuil de 20 N sur F_z alors que le MA a été défini comme l'instant lors duquel F_y transitionne d'une valeur négative à une valeur positive aux alentours de 50% de la phase d'appui.

Le t_c , t_v et t_f ont été obtenus à partir des CI et CF précédemment définis. En effet, t_c a été défini comme la période durant laquelle F_z était supérieure au seuil de 20N (Braga et coll, 2019), c'est-à-dire le temps entre le CI et le CF du même pied. t_v est donné par le temps entre le CF et le CI du même pied. t_f a quant à lui été calculé en additionnant t_c et t_v . Finalement, DF a été calculé en utilisant l'Eq. 1 précédemment définie (Alexander, 1980).

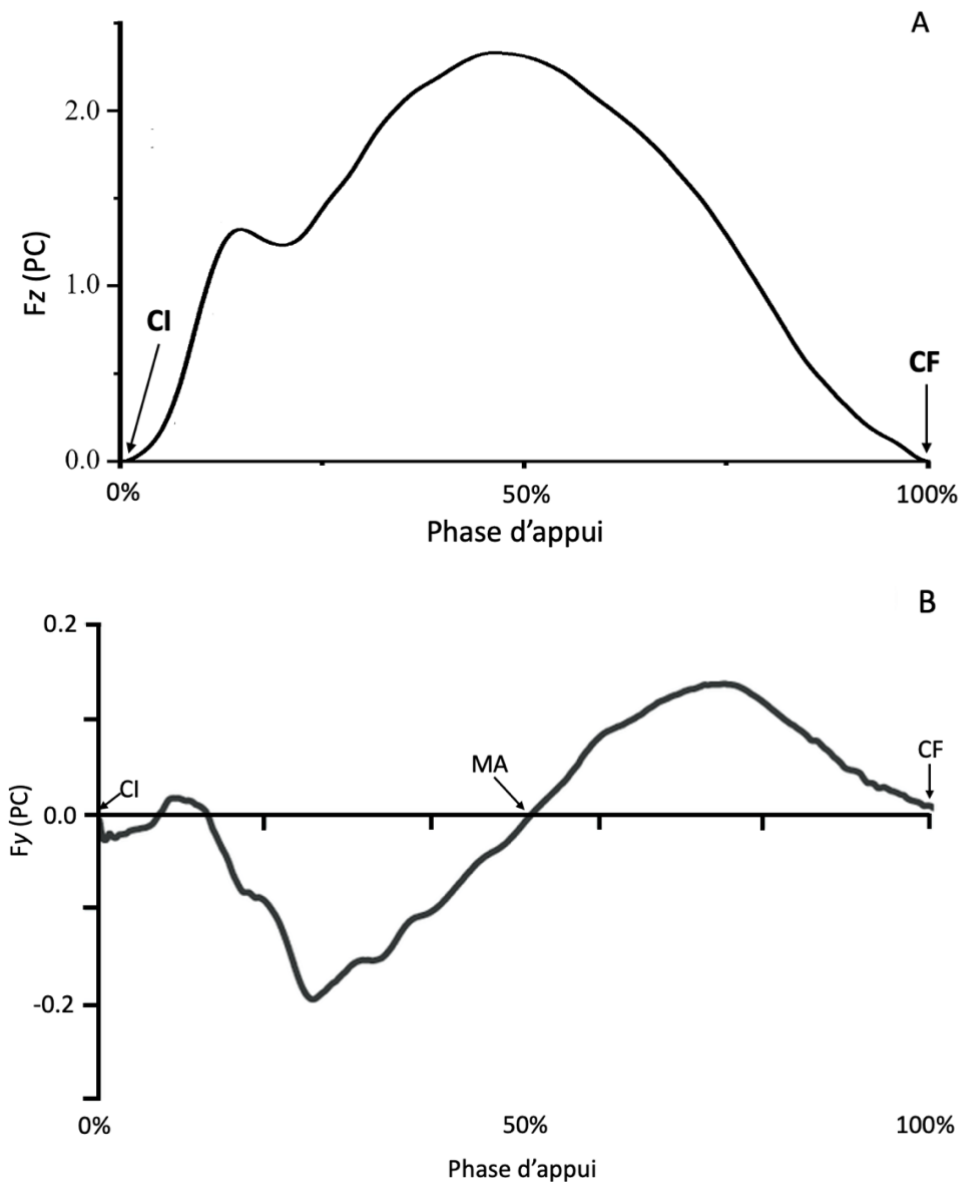


Figure 3. Illustration de (A) la force verticale de réaction au sol (F_z) et (B) la force antéro-postérieure (F_y) durant la phase d'appui et des moments spécifiques qui sont le contact initial (CI), le contact final (CF) et le milieu de l'appui (MA). Note. La force est exprimée en termes de proportion du poids corporel (PC).

De plus, la cinématique tridimensionnelle est largement utilisée pour quantifier le mouvement lors des analyses de la foulée (Lepoutre, 2007). Pour les articulations de la hanche, du genou et de la cheville, nous avons calculé les angles articulaires à l'aide de Visual3D. La cinématique angulaire tridimensionnelle a été obtenue en utilisant la technique de Cardan, souvent utilisée en biomécanique et étant équivalente au système de coordonnées conjoint (Cole et coll, 1993). Les angles de Cardan sont influencés par leur séquence ordonnée et peuvent affecter les paramètres angulaires résultants (Sinclair, 2014). Cette séquence comporte trois étapes : la première est une rotation autour de l'axe x dirigé latéralement ; la seconde rotation se fait autour de l'axe y dirigé antérieurement, alors que la troisième pivote autour de l'axe vertical z

(Robertson, 2013). Ces derniers correspondent aux mouvements articulaires suivants : flexion/extension, abduction/adduction et rotation interne/rotation externe (Wu et coll, 2002).

En ce qui concerne les angles articulaires (Figure 4), nous avons choisi de prendre en compte uniquement le premier angle de Cardan, c'est-à-dire la flexion-extension, en raison d'erreurs possibles dues à l'interférence du signal cinématique (Piazza et Cavanagh, 2000). Les angles articulaires des membres inférieurs (hanche, genou et cheville) ont été définis comme l'orientation du segment distal par rapport au segment proximal, correspondant au système de référence (Woltring, 1991). Par exemple, l'angle de l'articulation du genou a été calculé comme l'orientation de la jambe par rapport à la cuisse. Le référentiel anatomique exprimé pour l'articulation de la hanche a été défini en fonction de l'axe longitudinal (0°). La flexion de hanche correspond à une valeur positive et l'extension de hanche à une valeur négative (Pustoc'h, 2007). Pour l'angle du genou, le référentiel est caractérisé de la manière suivante : 0° représente une extension complète du genou (axe fémur-tibia à l'horizontale) et un angle négatif représente une flexion du genou. En ce qui concerne l'évaluation articulaire de la cheville, le référentiel choisi est de 0° lorsque le pied se trouve à 90° par rapport au tibia. L'angle devient positif lors d'une dorsiflexion et négatif lors d'une flexion plantaire (Lepoutre, 2007).

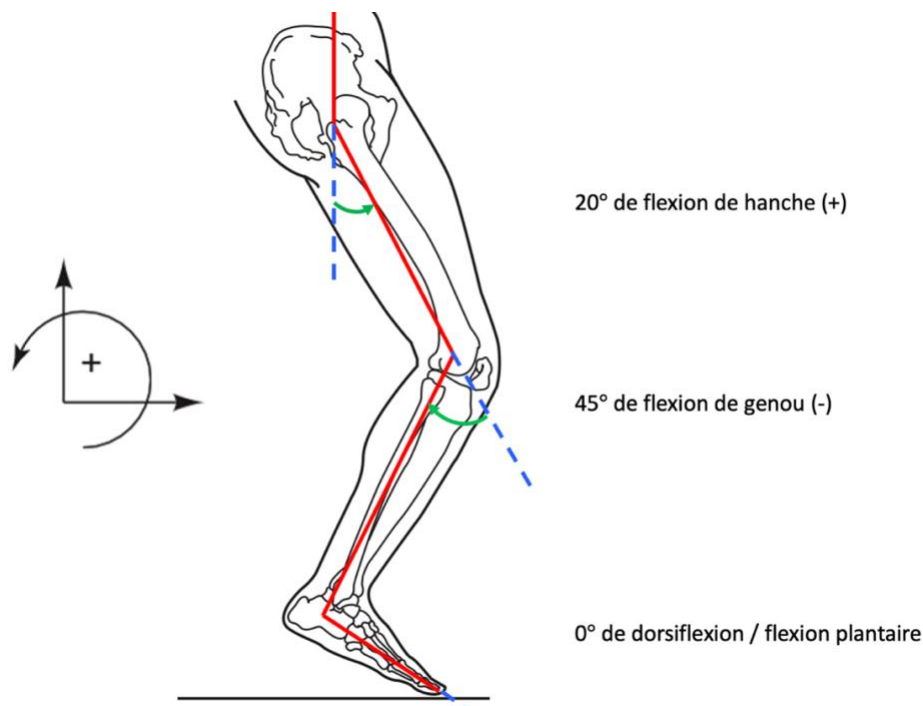


Figure 4. Illustration du référentiel des angles articulaires des membres inférieurs.

En plus des angles articulaires de hanche, cheville et genou, nous nous sommes également intéressés à l'angle formé entre le pied et le sol. Le segment pied a été obtenu à l'aide de cinq marqueurs placés aux apex latérale et médiale de la malléole, au calcaneum et à la tête des premier et cinquième métatarses. L'angle moyen du segment pied de l'essai statique en position debout a été soustrait de celui des essais en course, de sorte que 0° corresponde à un pied parallèle au sol (Altman et Davis, 2011). Pour chaque articulation (hanche, genou et cheville) ainsi que pour l'angle entre le segment pied et le sol, les angles aux CI, MA et CF ont été calculés ainsi que les différences d'angles ($\Delta\theta$) entre CI et MA et entre MA et CF.

En outre, trois variables biomécaniques faisant partie de l'échelle Volodalen (Gindre et coll, 2015) ont également été calculées. Il s'agit de la longueur de déplacement horizontale maximale du centre de l'articulation du coude (distance horizontale de la position la plus arrière à la plus avant durant chaque foulée), la position verticale du CDM du pelvis au CI et la distance horizontale entre le marqueur du talon (foot calcaneus; LCA ou RCA sur la Fig. 2) et le CDM du pelvis au CI. Ces trois mesures ont été normalisées par la taille des participants.

2.4. Analyses statistiques

2.4.1 Les variables

Afin d'effectuer les modèles de régression linéaire et les analyses en composantes principales, 32 variables ont été sélectionnées puis standardisées [(valeur – moyenne) / écart type] afin d'assurer la validité et l'interprétabilité des résultats obtenus. Parmi ces 32 variables, 20 d'entre elles représentent les angles et deltas d'angles relatifs aux articulations de la hanche, du genou, de la cheville et du pied par rapport au sol, six sont des variables anthropométriques ou relatives à la pratique de la course à pied du sujet (âge, genre, taille, masse, expérience, distance courue), trois d'entre elles sont celles de l'échelle Volodalen et trois sont liées aux caractéristiques des chaussures (dureté, drop, poids). Pour ce qui est de la notation, les angles correspondant à l'articulation de la hanche, du genou, de la cheville et du pied par rapport au sol sont notés au contact initial ($\theta_i^{CI} : i = \text{Pied, Cheville, Genou, Hanche}$), au contact final (θ_i^{CF}) et au milieu d'appui (θ_i^{MA}). Le $\Delta\theta$ représente une différence d'angle entre deux instants de l'appui.

2.4.2 Modèles de régression linéaire

Avant la réalisation de modèles de régression linéaire, la matrice des corrélations des 32 variables que nous avons choisi d'étudier a été réalisée aux trois vitesses de course afin

d'identifier d'éventuels problèmes de multicollinéarité. Une corrélation est considérée *forte* si la valeur du coefficient de Pearson (r) est supérieure ou égale à 0.70 et *modérée* entre 0.50 et 0.69 (Hinkle et coll, 2002). Ainsi, pour chaque paire de variables ayant au moins une fois une corrélation forte et deux fois une corrélation modérée, nous avons retiré une des deux variables. Nous avons choisi de conserver en priorité l'articulation la plus proche du sol, l'événement le plus proche du CI, le delta d'angle MA-CF plutôt que l'angle au CF et la taille plutôt que la masse car elle est davantage liée à la fréquence de foulée. Les intervalles de confiance 95% délimitant les limites hautes et basses des corrélations ont également été représentés. Toujours dans le but d'éviter les problèmes de multicollinéarité, nous avons pris la liberté de retirer l'angle de genou au MA ($\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA}}$) pour éviter sa coprésence avec l'angle de genou au CI ($\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$) et le delta d'angle calculé à partir de ces deux variables ($\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI-MA}}$). Cette procédure a réduit les 32 variables initiales à 21 variables non corrélées.

Ensuite, nous avons utilisé deux méthodes itératives (*forward* et *backward*) dans le but de trouver le meilleur sous-ensemble de variables indépendantes reliées au DF. Ainsi, deux modèles de régression linéaire ont été formés à chaque vitesse à partir des 21 variables non corrélées. Les variables communes à chacun de ces six modèles ont ensuite été utilisées pour former un ultime modèle de régression linéaire afin de constituer un modèle simple. La qualité des modèles de régression linéaire est exprimée par le coefficient de détermination ajusté (R_{aj}^2) mesurant la proximité entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles des données tout en éliminant l'influence du nombre de variables indépendantes présentes dans le modèle. Les conditions d'applications de ces modèles ont été vérifiées grâce au facteur d'inflation de la variance (VIF) pour la multicollinéarité ($1.03 \leq \text{valeur} \leq 4.31$), au test de Durbin-Watson pour l'indépendance des résidus ($0.16 \leq P \leq 0.71$), et au test de Shapiro-Wilk pour la normalité des résidus ($0.17 \leq P \leq 0.89$).

2.4.3 Analyse en composantes principales

Afin d'explorer la variance des données et leur éventuel lien avec le DF, des ACP ont été utilisées. Dans un premier temps, une ACP a été effectuée à chaque vitesse. Cependant, celles-ci n'ont pas été réalisées sur les 32 variables. En effet, l'indice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), aussi appelé MSA (Measure of Sampling Adequacy), et qui mesure la compressibilité des données en confrontant la corrélation brute et la corrélation partielle a été utilisé afin de réduire le nombre de variables sur lesquelles effectuer les ACP tout en optimisant la variance expliquée

par les premières CP. L'interprétation des valeurs de l'indice KMO se fait de la manière suivante : *inacceptable* entre 0.00 et 0.49, *misérable* entre 0.50 et 0.59, *médiocre* entre 0.60 et 0.69, *moyen* entre 0.70 et 0.79, *méritoire* entre 0.80 et 0.89 et *merveilleux* entre 0.90 et 1.00 (Glen, 2016). Ainsi, en partant des 32 variables, nous avons itérativement retiré la variable ayant l'indice KMO individuel le plus faible jusqu'à ce que l'indice KMO global soit maximal et nous avons réalisé une ACP à cette étape. Dans un deuxième temps, toujours en partant des 32 variables de bases et en utilisant le même procédé de retrait de la variable ayant l'indice KMO le plus faible, nous avons réalisé une ACP à chacune des étapes afin d'identifier le jeu de variables issu de ce procéder ayant la composante principale la plus corrélée avec le DF. Par cette démarche, ce que nous désirons observer est l'éventuel relation ou non-relation entre la quantité de variance expliquée par une CP et sa corrélation avec le DF ainsi que les scores des variables dans le cas où une CP a une corrélation significative avec le DF. Finalement, une dernière ACP a été effectuée sur les variables composant le modèle de régression linéaire rassemblant les variables communes aux six modèles de régression linéaire. Pour la totalité des ACP, nous avons choisi de présenter uniquement les CP jusqu'à ce que le pourcentage de variance expliquée soit supérieure ou égale à 70%, comme recommandé par le critère de Joliffe (Kaiser, 1961).

2.4.4 Logiciels utilisés et seuil de significativité

Nous avons utilisé Jamovi (v1.6.23, <https://www.jamovi.org>) pour réaliser la matrice des corrélations ainsi que tous les tests de conditions d'applications. Python (v3.7.4, <http://www.python.org>) a été utilisé pour réaliser les modèles de régression linéaire et les analyses en composantes principales. Le seuil de significativité a été fixé à $P \leq 0.05$.

3. Résultats

3.1 Sélection de variables issue de la matrice des corrélations

La matrice des corrélations (Annexe 1) de notre jeu de 32 variables nous a permis d'identifier 10 paires de variables fortement corrélées (Tableau 1).

Tableau 1. Paires de variables corrélées et leurs corrélations aux trois vitesses de course ainsi que la sélection des variables conservées/retirées. Toutes les corrélations présentées sont significatives ($P \leq 0.04$).

| Variables corrélées | | Corrélations et intervalles de confiances 95% | | |
|---|---|---|----------------------|----------------------|
| Conservées | Retirées | 9km/h | 11km/h | 13km/h |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ | $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI-MA}}$ | 0.95 [0.93, 0.97] | 0.96 [0.94, 0.97] | 0.96 [0.94, 0.97] |
| $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$ | $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CF}}$ | -0.88 [-0.83, -0.91] | -0.86 [-0.81, -0.90] | -0.85 [-0.78, -0.89] |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ | $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CF}}$ | -0.76 [-0.67, -0.83] | -0.62 [-0.49, -0.72] | -0.52 [-0.38, -0.64] |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ | $\Delta\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CI-MA}}$ | 0.82 [0.75, 0.87] | 0.83 [0.76, 0.88] | 0.82 [0.75, 0.87] |
| $\Delta\theta_{\text{Cheville}}^{\text{MA-CF}}$ | $\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CF}}$ | -0.89 [-0.85, -0.92] | -0.89 [-0.84, -0.92] | -0.89 [-0.84, -0.92] |
| $\theta_{\text{Hanche}}^{\text{CI}}$ | $\theta_{\text{Hanche}}^{\text{MA}}$ | 0.89 [0.85, 0.92] | 0.88 [0.83, 0.91] | 0.88 [0.84, 0.92] |
| $\theta_{\text{Hanche}}^{\text{CI}}$ | $\theta_{\text{Hanche}}^{\text{CF}}$ | 0.81 [0.74, 0.87] | 0.79 [0.71, 0.85] | 0.78 [0.69, 0.84] |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ | $\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CI}}$ | 0.84 [0.78, 0.88] | 0.86 [0.81, 0.90] | 0.87 [0.82, 0.91] |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ | $\Delta\theta_{\text{Hanche}}^{\text{MA-CF}}$ | -0.73 [-0.63, -0.80] | -0.77 [-0.68, -0.83] | -0.79 [-0.71, -0.85] |
| Taille | Masse | 0.70 [0.59, 0.78] | 0.70 [0.59, 0.78] | 0.70 [0.59, 0.78] |

Note. Angles correspondant à l'articulation de la hanche, du genou, de la cheville et du pied par rapport au sol au contact initial (θ_i^{CI} : $i = \text{Pied, Cheville, Genou, Hanche}$), au contact final (θ_i^{CF}) et au milieu d'appui (θ_i^{MA}). $\Delta\theta$ représente une différence d'angle entre deux instants de l'appui.

3.2 Variables sélectionnées pour les modèles de regression linéaire

Les algorithmes de sélection forward et backward ont fait ressortir 11 variables différentes à travers les six modèles de régression linéaire formés. Dix d'entre elles se sont avérées avoir une relation individuelle significative avec le DF. Parmi ces variables, six ont été sélectionnées à six reprises dans les modèles (à chaque vitesse et pour les modalités de sélection forward et backward ; Tableau 2). Ces variables communes aux différents modèles possèdent les plus grands coefficients dans chacun de ceux-ci. On peut observer une baisse du R_{aj}^2 des modèles de régression linéaire avec l'augmentation de la vitesse de course : -13.1% de 9 à 11 km/h et -5.7% de 11 à 13 km/h. En moyenne, les coefficients des variables ont eux aussi diminués avec l'augmentation de la vitesse : -1.5% de 9 à 11 km/h et -9.2% de 11 à 13 km/h.

Tableau 2. Modèles de régression linéaire formés grâce aux algorithmes de sélection *forward* et *backward* à partir de 21 variables indépendantes présélectionnées vis-à-vis de la variable dépendante *duty factor*.

| Forward | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|-------------|-----------------|----------|------------|
| Vitesse (km/h) | Variable | Coefficient | Erreur standard | <i>P</i> | R_{aj}^2 |
| 9 | Constante | 37.66 | 0.13 | <0.001 | 0.80 |
| | $\Delta\theta_{Genou}^{MA-CF}$ | 1.26 | 0.15 | <0.001 | |
| | $d_{Pied-Pelvis}^{CI}$ | 1.13 | 0.16 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Pied}^{MA-CF}$ | 1.06 | 0.15 | <0.001 | |
| | θ_{Pied}^{CI} | 0.85 | 0.15 | <0.001 | |
| | Taille | 0.61 | 0.14 | <0.001 | |
| | θ_{Genou}^{CI} | -0.53 | 0.14 | <0.001 | |
| 11 | Constante | 34.72 | 0.13 | <0.001 | 0.69 |
| | $d_{Pied-Pelvis}^{CI}$ | 0.96 | 0.17 | <0.001 | |
| | θ_{Pied}^{CI} | 0.92 | 0.15 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Pied}^{MA-CF}$ | 0.91 | 0.14 | <0.001 | |
| | Taille | 0.72 | 0.14 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Genou}^{MA-CF}$ | 0.69 | 0.15 | <0.001 | |
| | Age | 0.38 | 0.13 | 0.004 | |
| θ_{Genou}^{CI} | -0.64 | 0.14 | <0.001 | | |
| 13 | Constante | 32.58 | 0.12 | <0.001 | 0.65 |
| | θ_{Pied}^{CI} | 0.91 | 0.14 | <0.001 | |
| | $d_{Pied-Pelvis}^{CI}$ | 0.73 | 0.18 | <0.001 | |
| | Taille | 0.65 | 0.13 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Pied}^{MA-CF}$ | 0.65 | 0.13 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Genou}^{MA-CF}$ | 0.40 | 0.14 | 0.006 | |
| | Age | 0.37 | 0.12 | 0.003 | |
| | $\Delta\theta_{Hanche}^{CI-MA}$ | 0.25 | 0.16 | 0.14 | |
| θ_{Genou}^{CI} | -0.63 | 0.15 | <0.001 | | |
| Backward | | | | | |
| 9 | Constante | 37.66 | 0.13 | <0.001 | 0.81 |
| | $\Delta\theta_{Genou}^{MA-CF}$ | 1.18 | 0.15 | <0.001 | |
| | $d_{Pied-Pelvis}^{CI}$ | 1.11 | 0.16 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Pied}^{MA-CF}$ | 1.09 | 0.15 | <0.001 | |
| | θ_{Pied}^{CI} | 0.86 | 0.15 | <0.001 | |
| | Taille | 0.64 | 0.14 | <0.001 | |
| | Age | 0.27 | 0.13 | 0.04 | |
| | θ_{Genou}^{CI} | -0.56 | 0.14 | <0.001 | |
| 11 | Constante | 34.72 | 0.12 | <0.001 | 0.71 |
| | θ_{Pied}^{CI} | 0.94 | 0.15 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Pied}^{MA-CF}$ | 0.91 | 0.14 | <0.001 | |
| | $d_{Pied-Pelvis}^{CI}$ | 0.90 | 0.17 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Genou}^{MA-CF}$ | 0.69 | 0.14 | <0.001 | |

| | | | | | |
|----|--|-------|------|--------|------|
| | Age | 0.40 | 0.13 | 0.003 | |
| | Dureté chaussure | 0.30 | 0.13 | 0.02 | |
| | $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$ | -0.62 | 0.14 | <0.001 | |
| | Constante | 32.58 | 0.12 | <0.001 | |
| | $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ | 0.89 | 0.14 | <0.001 | |
| | $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ | 0.79 | 0.15 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$ | 0.72 | 0.13 | <0.001 | |
| 13 | Taille | 0.66 | 0.12 | <0.001 | 0.67 |
| | Age | 0.60 | 0.14 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ | 0.42 | 0.13 | 0.002 | |
| | Distance courue | -0.25 | 0.13 | 0.05 | |
| | Expérience | -0.33 | 0.15 | 0.02 | |
| | $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$ | -0.76 | 0.13 | <0.001 | |

Note. Les variables sont classées en fonction de la valeur de leur coefficient pour chacune des trois vitesses. Les coefficients sont standardisés. Les variables non communes aux 6 modèles sont présentées en gris. Les valeurs du coefficient de détermination ajusté (R_{aj}^2) représentent la qualité des modèles de régression linéaires. Le seuil de significativité a été fixé à $P \leq 0.05$. Angles correspondant à l'articulation de la hanche, du genou, de la cheville et du pied par rapport au sol au contact initial (θ_i^{CI} : $i = \text{Pied, Cheville, Genou, Hanche}$), au contact final (θ_i^{CF}) et au milieu d'appui (θ_i^{MA}). $\Delta\theta$ représente une différence d'angle entre deux instants de l'appui. $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ correspond à la distance horizontale entre le pied et le pelvis au moment du CI. Expérience correspond au nombre d'années de pratique de la course à pied du sujet. Distance courue correspond à la distance hebdomadaire courue par le sujet en moyenne. Dureté chaussure correspond à la dureté des matières plastiques présentes dans la semelle.

3.3 Modèles de régression linéaire formés à partir des six variables communes

La valeur de R_{aj}^2 de ces modèles est comprise entre 0.62 et 0.80 et diminue avec l'augmentation de la vitesse de course : -16.2% de 9 à 11 km/h et -7.5% de 11 à 13 km/h. Les six variables composant ces modèles ont toutes une valeur $P < 0.001$ peu importe la vitesse de course, ce qui indique une relation significative avec le DF. Concernant les coefficients, $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$, $d_{\text{pied-pelvis}}^{\text{CI}}$ et $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ voient leurs coefficients diminuer avec l'augmentation de la vitesse de course, respectivement de 16.0%, 9.7% et 38.9% de 9 à 11 km/h et de 24.7%, 12,8% et 29.9% de 11 à 13 km/h. Cependant, ce n'est pas le cas pour toutes les variables. En effet, pour $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ et $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$, leurs coefficients augmentent avec la vitesse : +7.1% et +13.2% de 9 à 11km/h et +3.3% et +18.3% de 11 à 13km/h, alors que pour la taille le coefficient tend à être stable avec l'évolution de la vitesse. Toutefois, avec l'augmentation de la vitesse de course, la baisse des coefficients est plus marquée que leur augmentation. On l'observe notamment avec le passage de trois coefficients supérieurs à 1 en valeur absolue à 9 km/h, à un seul à 11 km/h et à aucun à 13 km/h.

Tableau 3. Modèles de régression linéaire formés à chaque vitesse de course à partir de six variables présélectionnées vis-à-vis de la variable dépendante *duty factor*.

| Vitesse (km/h) | Variable | Coefficient | Erreur standard | <i>P</i> | R_{aj}^2 |
|----------------|--------------------------------|-------------|-----------------|----------|------------|
| 9 | Constante | 37.66 | 0.13 | <0.001 | 0.80 |
| | $\Delta\theta_{Genou}^{MA-CF}$ | 1.26 | 0.15 | <0.001 | |
| | $d_{Pied-Pelvis}^{CI}$ | 1.13 | 0.16 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Pied}^{MA-CF}$ | 1.06 | 0.15 | <0.001 | |
| | θ_{Pied}^{CI} | 0.85 | 0.15 | <0.001 | |
| | Taille | 0.61 | 0.14 | <0.001 | |
| | θ_{Genou}^{CI} | -0.53 | 0.14 | <0.001 | |
| 11 | Constante | 34.72 | 0.13 | <0.001 | 0.67 |
| | $d_{Pied-Pelvis}^{CI}$ | 1.02 | 0.17 | <0.001 | |
| | θ_{Pied}^{CI} | 0.91 | 0.16 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Pied}^{MA-CF}$ | 0.89 | 0.15 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Genou}^{MA-CF}$ | 0.77 | 0.15 | <0.001 | |
| | Taille | 0.70 | 0.14 | <0.001 | |
| | θ_{Genou}^{CI} | -0.60 | 0.15 | <0.001 | |
| 13 | Constante | 32.58 | 0.13 | <0.001 | 0.62 |
| | θ_{Pied}^{CI} | 0.94 | 0.15 | <0.001 | |
| | $d_{Pied-Pelvis}^{CI}$ | 0.89 | 0.16 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Pied}^{MA-CF}$ | 0.67 | 0.14 | <0.001 | |
| | Taille | 0.63 | 0.13 | <0.001 | |
| | $\Delta\theta_{Genou}^{MA-CF}$ | 0.54 | 0.14 | <0.001 | |
| | θ_{Genou}^{CI} | -0.71 | 0.14 | <0.001 | |

Note. Les variables sont classées en fonction de la valeur de leur coefficient pour chacune des trois vitesses. Les coefficients sont standardisés. Les valeurs du coefficient de détermination ajusté (R_{aj}^2) représentent la qualité des modèles de régression linéaires. Le seuil de significativité a été fixé à $P \leq 0.05$. Angles correspondant à l'articulation de la hanche, du genou, de la cheville et du pied par rapport au sol au contact initial ($\theta_i^{CI} : i = Pied, Cheville, Genou, Hanche$), au contact final (θ_i^{CF}) et au milieu d'appui (θ_i^{MA}). $\Delta\theta$ représente une différence d'angle entre deux instants de l'appui. $d_{Pied-Pelvis}^{CI}$ correspond à la distance horizontale entre le pied et le pelvis au moment du CI.

3.4 Analyses en composantes principales à partir des variables présentes dans les modèles lorsque l'indice KMO est maximal

L'indice KMO nous a permis de réduire le nombre de variables sur lequel effectuer l'ACP tout en maximisant la variance expliquée par les premières CP. Les KMO obtenus à 9 et 11 km/h sont *moyens* et celui obtenu à 13 km/h est *méritoire*. A 9 et 11 km/h, seules trois CP ont suffi à expliquer plus de 70% de la variance alors que quatre CP ont été nécessaires à 13 km/h. En effet, avec l'augmentation de la vitesse de course, on observe une diminution de la variance expliquée par les CP. Toutefois, on peut voir que la première CP explique au minimum 40.8% de la variance expliquée. Concernant les variables sélectionnées à partir du jeu initial de 32

variables, on observe que celles-ci sont principalement anthropométriques ou liées aux caractéristiques des chaussures à 9 et 11 km/h alors qu'elles sont toutes liées à la biomécanique de course à 13 km/h.

Les corrélations entre les composantes principales et le DF sont variables ($-0.44 \leq |r| \leq 0.44$). En effet, il est difficile de repérer une tendance entre l'évolution de la vitesse et la valeur des corrélations. On peut également constater qu'il n'y a pas nécessairement de lien entre la corrélation de la CP avec le DF et la variance expliquée. Cependant, on remarque tout de même une corrélation importante de la CP1 (composante qui explique le plus de variance expliquée dans les données) avec le DF à 9 et 13 km/h. Pour ce qui est des scores, ils seront interprétés dans la discussion. Néanmoins, on peut noter que la variable $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ a obtenu le plus grand score (0.91).

Tableau 4. Analyse en composante principale à partir des variables présentes dans le modèle lorsque l'indice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) est maximal pour chaque vitesse de course.

| Vitesse | | 9km/h | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|---------|---------|
| KMO = 0.78 | CP1 | CP2 | CP3 | Cumulée | |
| Variance expliquée % | 50.2 | 16.8 | 11.7 | 78.7 | |
| Corrélation avec DF | -0.40 | 0.01 | 0.44 | | |
| P valeur | <0.001 | 0.903 | <0.001 | | |
| Variable | Score CP1 | Score CP2 | Score CP3 | | |
| Déplacement coude | 0.36 | 0.52 | 0.21 | | |
| Poids chaussure | -0.27 | 0.72 | -0.08 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ | -0.36 | -0.14 | 0.91 | | |
| Genre | -0.46 | -0.30 | -0.32 | | |
| Masse | -0.47 | 0.29 | -0.02 | | |
| Taille | -0.49 | 0.10 | -0.15 | | |
| Vitesse | | 11km/h | | | |
| KMO = 0.77 | CP1 | CP2 | CP3 | Cumulée | |
| Variance expliquée % | 43.6 | 15.5 | 12.8 | 71.9 | |
| Corrélation avec DF | 0.19 | -0.24 | -0.16 | | |
| P valeur | 0.038 | 0.009 | 0.084 | | |
| Variable | Score CP1 | Score CP2 | Score CP3 | | |
| Taille | 0.49 | -0.12 | -0.01 | | |
| Genre | 0.46 | 0.17 | -0.34 | | |
| Poids chaussure | 0.26 | -0.63 | 0.32 | | |
| Dureté chaussure | -0.19 | -0.57 | -0.65 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Hanche}}^{\text{MA-CF}}$ | -0.33 | -0.16 | -0.35 | | |
| Déplacement coude | -0.36 | -0.33 | 0.49 | | |
| Masse | -0.45 | -0.31 | 0.02 | | |
| Vitesse | | 13km/h | | | |
| KMO = 0.82 | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 | Cumulée |

| Variance expliquée % | 40.8 | 12.7 | 11.9 | 9.2 | 74.6 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|------|
| Corrélation avec DF | -0.44 | -0.09 | -0.30 | -0.18 | |
| <i>P</i> valeur | <0.001 | 0.343 | 0.001 | 0.051 | |
| Variable | Score CP1 | Score CP2 | Score CP3 | Score CP4 | |
| $\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA}}$ | 0.41 | -0.10 | -0.40 | 0.07 | |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ | 0.38 | -0.43 | -0.35 | -0.11 | |
| $h_{\text{Pelvis}}^{\text{CI}}$ | 0.27 | 0.61 | -0.15 | -0.48 | |
| $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$ | -0.31 | 0.06 | -0.60 | -0.46 | |
| $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ | -0.41 | -0.06 | -0.04 | -0.12 | |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI-MA}}$ | -0.43 | -0.01 | 0.16 | -0.31 | |

Note. Les variables sont classées en fonction de la valeur de leur score pour la composante principale 1 (CP1). La valeur du score exprime le poids de la variable dans la CP. Les CP ont été présentées jusqu'à que la variance expliquée cumulée soit $\geq 70\%$. La corrélation avec DF exprime le r entre la CP et le *duty factor* (DF). La *P* valeur exprimée est issue de la corrélation de la CP avec le DF. Le seuil de significativité a été fixé à $P \leq 0.05$. Angles correspondant à l'articulation de la hanche, du genou, de la cheville et du pied par rapport au sol au contact initial ($\theta_i^{\text{CI}} : i = \text{Pied, Cheville, Genou, Hanche}$), au contact final (θ_i^{CF}) et au milieu d'appui (θ_i^{MA}). $\Delta\theta$ représente une différence d'angle entre deux instants de l'appui. $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ correspond à la distance horizontale entre le pied et le pelvis au moment du CI. $h_{\text{Pelvis}}^{\text{CI}}$ correspond à la hauteur du centre de masse du pelvis au moment du CI. Déplacement du coude représente la distance horizontale maximale parcourue par l'articulation du coude. Dureté chaussure correspond à la dureté des matières plastiques présentes dans la semelle.

3.5 Analyses en composantes principales issues de l'étape de sélection de variables par l'indice KMO contenant la CP la mieux corrélée avec le DF

Les ACP qui ont permis d'obtenir les résultats présentés dans le tableau 5 n'ont pas été effectuées sur les mêmes variables et le même nombre de variables pour chacune des vitesses. En effet, nous nous sommes intéressés à l'étape de sélection qui présentait la CP la plus corrélée avec le DF. Par conséquent, l'ACP a été effectuée à partir de 23 variables à 9 km/h, 24 variables à 11 km/h et 32 variables à 13 km/h. La valeur de l'indice KMO étant directement lié aux nombres de variables ayant été retirées pour affiner notre jeu de données et maximiser la variance expliquée par les premières composantes principales, il est normal d'obtenir une valeur dite *misérable* à 9 et 11 km/h et *inacceptable* à 13 km/h car la sélection n'était pas encore terminée. On peut voir que sept des neuf CP dotées d'une corrélation significative avec le DF font parties d'une des trois premières CP pour chaque vitesse. Les scores seront traités dans la partie discussion.

Tableau 5. Analyse en composantes principales provenant de l'étape de sélection via l'indice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) contenant la composante principale (PC) la plus corrélée avec le *duty factor* (DF) pour chaque vitesse de course.

| Vitesse | | 9km/h | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| KMO = 0.57 | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 | CP5 | CP6 | CP7 | Cumulée |
| Variance expliquée % | 19.5 | 18.6 | 9.2 | 7.6 | 7.4 | 6.4 | 4.8 | 73.3 |
| Corrélation avec DF | -0.60 | 0.09 | 0.31 | -0.13 | -0.10 | -0.23 | -0.07 | |
| P valeur | <0.001 | 0.35 | 0.001 | 0.17 | 0.27 | 0.01 | 0.48 | |
| Variable | Sc. CP1 | Sc. CP2 | Sc. CP3 | Sc. CP4 | Sc. CP5 | Sc. CP6 | Sc. CP7 | |
| $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CF}}$ | 0.23 | | -0.29 | | | 0.31 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Hanche}}^{\text{MA-CF}}$ | 0.16 | | -0.03 | | | -0.02 | | |
| Distance courue | 0.13 | | -0.17 | | | -0.31 | | |
| Déplacement coude | 0.12 | | 0.06 | | | 0.32 | | |
| $\theta_{\text{Hanche}}^{\text{MA}}$ | 0.07 | | -0.17 | | | -0.09 | | |
| Dureté chaussure | 0.05 | | 0.13 | | | 0.01 | | |
| Expérience | -0.03 | | 0.09 | | | -0.36 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI-MA}}$ | -0.07 | | 0.27 | | | -0.04 | | |
| $\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA}}$ | -0.07 | | -0.42 | | | 0.31 | | |
| Age | -0.07 | | 0.02 | | | -0.29 | | |
| $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ | -0.09 | | 0.42 | | | -0.13 | | |
| Genre | -0.11 | | -0.01 | | | -0.14 | | |
| $\theta_{\text{Cheville}}^{\text{MA}}$ | -0.12 | | -0.05 | | | -0.31 | | |
| Drop chaussure | -0.15 | | 0.29 | | | 0.37 | | |
| Taille | -0.15 | | 0.05 | | | 0.15 | | |
| Poids chaussure | -0.18 | | 0.34 | | | 0.24 | | |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA}}$ | -0.20 | | -0.21 | | | -0.06 | | |
| Masse | -0.21 | | 0.19 | | | 0.09 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ | -0.26 | | -0.02 | | | -0.08 | | |
| $\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CI}}$ | -0.38 | | -0.20 | | | -0.04 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI-MA}}$ | -0.38 | | -0.06 | | | 0.03 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CI-MA}}$ | -0.38 | | -0.21 | | | 0.10 | | |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ | -0.39 | | -0.12 | | | 0.01 | | |
| Vitesse | | 11km/h | | | | | | |
| KMO = 0.56 | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 | CP5 | CP6 | CP7 | Cumulée |
| Variance expliquée % | 21.0 | 16.3 | 11.3 | 7.8 | 7.0 | 6.1 | 5.4 | 74.9 |
| Corrélation avec DF | 0.32 | 0.30 | -0.57 | -0.04 | -0.02 | -0.21 | 0.03 | |
| P valeur | 0.001 | 0.001 | <0.001 | 0.65 | 0.87 | 0.03 | 0.79 | |
| Variable | Sc. CP1 | Sc. CP2 | Sc. CP3 | Sc. CP4 | Sc. CP5 | Sc. CP6 | Sc. CP7 | |
| $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI-MA}}$ | 0.36 | 0.23 | 0.01 | | | -0.12 | | |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ | 0.36 | 0.27 | 0.04 | | | -0.09 | | |
| $\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CI}}$ | 0.33 | 0.28 | 0.05 | | | -0.15 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI-MA}}$ | 0.29 | -0.05 | -0.15 | | | 0.15 | | |
| $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ | 0.27 | -0.07 | -0.27 | | | 0.29 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CI-MA}}$ | 0.27 | 0.29 | 0.10 | | | -0.28 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Hanche}}^{\text{MA-CF}}$ | 0.25 | -0.27 | 0.04 | | | 0.10 | | |
| $\theta_{\text{Cheville}}^{\text{MA}}$ | 0.22 | 0.06 | -0.09 | | | 0.20 | | |
| Déplacement coude | 0.19 | -0.18 | 0.07 | | | -0.22 | | |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA}}$ | 0.14 | 0.22 | 0.11 | | | 0.06 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$ | 0.12 | -0.16 | -0.41 | | | -0.13 | | |
| $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CF}}$ | 0.08 | -0.24 | 0.21 | | | -0.30 | | |
| Dureté chaussure | 0.08 | -0.11 | 0.01 | | | 0.33 | | |
| $\theta_{\text{Hanche}}^{\text{MA}}$ | 0.04 | 0.01 | 0.38 | | | 0.28 | | |
| Drop chaussure | 0.03 | 0.16 | -0.10 | | | 0.30 | | |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CF}}$ | -0.03 | 0.24 | 0.39 | | | 0.14 | | |
| Poids chaussure | -0.04 | 0.25 | -0.10 | | | 0.25 | | |
| $\theta_{\text{Hanche}}^{\text{CI}}$ | -0.11 | 0.16 | 0.35 | | | 0.21 | | |
| Masse | -0.11 | 0.25 | -0.32 | | | -0.07 | | |
| $h_{\text{pelvis}}^{\text{CI}}$ | -0.11 | -0.01 | 0.13 | | | -0.31 | | |
| Distance courue | -0.16 | -0.06 | 0.06 | | | -0.01 | | |
| Taille | -0.19 | 0.25 | -0.21 | | | -0.12 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ | -0.22 | 0.31 | -0.07 | | | -0.12 | | |

| Genre | -0.22 | 0.22 | -0.17 | | | | 0.12 | |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Vitesse | 13km/h | | | | | | | |
| KMO = 0.38 | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 | CP5 | CP6 | CP7 | Cumulée |
| Variance expliquée % | 16.8 | 14.3 | 10.5 | 8.1 | 7.8 | 6.2 | 5.2 | 73.6 |
| Corrélation avec DF | 0.54 | 0.05 | -0.40 | 0.14 | -0.17 | -0.24 | 0.08 | |
| <i>P</i> valeur | <0.001 | 0.56 | <0.001 | 0.14 | 0.07 | 0.01 | 0.38 | |
| Variable | Sc. CP1 | Sc. CP2 | Sc. CP3 | Sc. CP4 | Sc. CP5 | Sc. CP6 | Sc. CP7 | |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ | 0.38 | | -0.01 | | | 0.02 | | |
| $\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CI}}$ | 0.37 | | 0.02 | | | 0.06 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI-MA}}$ | 0.37 | | 0.01 | | | -0.02 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CI-MA}}$ | 0.31 | | 0.08 | | | -0.02 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI-MA}}$ | 0.28 | | -0.13 | | | 0.13 | | |
| $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ | 0.28 | | -0.08 | | | -0.14 | | |
| $\theta_{\text{Cheville}}^{\text{MA}}$ | 0.25 | | -0.11 | | | 0.19 | | |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA}}$ | 0.17 | | -0.03 | | | 0.11 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Hanche}}^{\text{MA-CF}}$ | 0.16 | | 0.14 | | | 0.14 | | |
| $\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CF}}$ | 0.15 | | 0.05 | | | 0.14 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Hanche}}^{\text{CI-MA}}$ | 0.13 | | -0.08 | | | -0.31 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$ | 0.11 | | -0.24 | | | -0.14 | | |
| $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$ | 0.07 | | -0.01 | | | -0.08 | | |
| Dureté chaussure | 0.06 | | 0.07 | | | -0.09 | | |
| Drop chaussure | 0.05 | | -0.10 | | | -0.17 | | |
| Expérience | 0.05 | | -0.04 | | | -0.28 | | |
| Déplacement coude | 0.05 | | 0.18 | | | -0.20 | | |
| Poids chaussure | 0.04 | | -0.18 | | | -0.27 | | |
| Age | 0.02 | | -0.02 | | | -0.35 | | |
| $\theta_{\text{Hanche}}^{\text{MA}}$ | 0.01 | | 0.40 | | | -0.01 | | |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CF}}$ | -0.01 | | 0.19 | | | 0.18 | | |
| $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CF}}$ | -0.02 | | 0.19 | | | -0.04 | | |
| Masse | -0.04 | | -0.33 | | | -0.18 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Cheville}}^{\text{MA-CF}}$ | -0.04 | | -0.01 | | | -0.06 | | |
| $\theta_{\text{Hanche}}^{\text{CF}}$ | -0.07 | | 0.31 | | | -0.09 | | |
| $\theta_{\text{Hanche}}^{\text{CI}}$ | -0.08 | | 0.37 | | | -0.16 | | |
| Taille | -0.10 | | -0.30 | | | -0.01 | | |
| Genre | -0.10 | | -0.28 | | | 0.22 | | |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ | -0.14 | | -0.07 | | | -0.12 | | |
| $h_{\text{Pelvis}}^{\text{CI}}$ | -0.15 | | 0.10 | | | -0.19 | | |
| Distance courue | -0.16 | | -0.01 | | | 0.40 | | |
| $\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA}}$ | -0.17 | | 0.10 | | | -0.17 | | |

Note. Les variables sont classées en fonction de la valeur de leur score (Sc.) pour la première composante principale (CP1). La valeur du score exprime le poids de la variable dans la CP. Les valeurs des scores ont été représentées lorsque *r* entre la CP et le *duty factor* (DF) était significatif. Le code couleur évolue du brun (scores positifs) au bleu (scores négatifs). Le seuil de significativité a été fixé à $P \leq 0.05$. Les CP ont été présentées jusqu'à ce que la variance expliquée cumulée soit $\geq 70\%$. Angles correspondant à l'articulation de la hanche, du genou, de la cheville et du pied par rapport au sol au contact initial (θ_i^{CI} : $i = \text{Pied, Cheville, Genou, Hanche}$), au contact final (θ_i^{CF}) et au milieu d'appui (θ_i^{MA}). $\Delta\theta$ représente une différence d'angle entre deux instants de l'appui. $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ correspond à la distance horizontale entre le pied et le pelvis au moment du CI. $h_{\text{Pelvis}}^{\text{CI}}$ correspond à la hauteur du centre de masse du pelvis au moment du CI. Déplacement du coude représente la distance horizontale maximale parcourue par l'articulation du coude. Expérience correspond au nombre d'années de pratique de la course à pied du sujet. Distance courue correspond à la distance hebdomadaire courue par le sujet en moyenne. Dureté chaussure correspond à la dureté des matières plastiques présentes dans la semelle. Drop chaussure correspond à la différence de d'épaisseur entre l'arrière et l'avant de la chaussure.

3.6 Analyse en composantes principales à partir des 6 variables communes aux modèles de régression linéaire

Les trois premières CP expliquent plus de 70% de la variance des données (Tableau 6). Cela s'explique en grande partie car le modèle n'est composé que de six variables. Cependant, chacune des CP explique entre 16.8 et 31.6% de la variance des données et a une corrélation avec le DF comprise entre 0.18 et 0.73 en valeur absolue. La CP la plus corrélée avec le DF à 9 km/h a une valeur de 0.73, de 0.58 à 11 km/h et de 0.46 à 13 km/h. Ainsi, on constate une tendance à la baisse de la corrélation maximale des CP avec l'augmentation de la vitesse, de 20.6% de 9 à 11 km/h et de 20.7% de 11 à 13 km/h. Cette observation confirme les observations faites dans le tableau 3 où une baisse de la qualité des modèles de régression linéaire ayant pour variable dépendante le DF avait été observée en utilisant ces mêmes variables. Les scores seront interprétés dans la discussion.

Tableau 6. Analyse en composantes principales à partir des 6 variables communes aux modèles de régression linéaire.

| Vitesse | | 9km/h | | |
|--|-----------|-----------|-----------|---------|
| Composante principale | CP1 | CP2 | CP3 | Cumulée |
| Variance expliquée % | 29.6 | 25.3 | 18.8 | 73.7 |
| Corrélation avec DF | 0.73 | -0.18 | -0.43 | |
| Variable | Score CP1 | Score CP2 | Score CP3 | |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ | 0.54 | 0.04 | 0.42 | |
| $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$ | 0.50 | 0.05 | -0.53 | |
| $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ | 0.46 | 0.45 | -0.28 | |
| $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$ | 0.41 | -0.13 | 0.61 | |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ | 0.27 | -0.57 | -0.28 | |
| Taille | 0.07 | -0.66 | -0.08 | |
| Vitesse | | 11km/h | | |
| Composante principale | CP1 | CP2 | CP3 | Cumulée |
| Variance expliquée % | 31.6 | 22.2 | 17.2 | 71.0 |
| Corrélation avec DF | 0.34 | -0.26 | 0.58 | |
| Variable | Score CP1 | Score CP2 | Score CP3 | |
| $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ | 0.60 | -0.01 | 0.24 | |
| $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$ | 0.36 | -0.03 | 0.74 | |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ | 0.36 | -0.58 | -0.20 | |
| $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$ | 0.03 | -0.70 | -0.19 | |
| Taille | -0.40 | -0.29 | 0.47 | |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ | -0.46 | -0.27 | 0.32 | |
| Vitesse | | 13km/h | | |
| Composante principale | CP1 | CP2 | CP3 | Cumulée |
| Variance expliquée % | 31.5 | 23.7 | 16.8 | 72.0 |
| Corrélation avec DF | 0.46 | 0.21 | 0.31 | |

| Variable | Score CP1 | Score CP2 | Score CP3 |
|--|-----------|-----------|-----------|
| $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ | 0.61 | -0.02 | 0.01 |
| $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ | 0.41 | 0.51 | -0.25 |
| $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$ | 0.40 | 0.04 | 0.67 |
| $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$ | 0.07 | 0.70 | -0.08 |
| Taille | -0.30 | 0.27 | 0.69 |
| $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ | -0.44 | 0.41 | -0.08 |

Note. Les variables sont classées en fonction de la valeur de leur score pour la première composante principale (CP1). La valeur du score exprime le poids de la variable dans la CP. Les CP ont été présentées jusqu'à que la variance expliquée cumulée soit $\geq 70\%$. La corrélation avec DF exprime r entre la CP et le *duty factor* (DF). Angles correspondant à l'articulation de la hanche, du genou, de la cheville et du pied par rapport au sol au contact initial (θ_i^{CI} : $i = \text{Pied, Cheville, Genou, Hanche}$), au contact final (θ_i^{CF}) et au milieu d'appui (θ_i^{MA}). $\Delta\theta$ représente une différence d'angle entre deux instants de l'appui. $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ correspond à la distance horizontale entre le pied et le pelvis au moment du CI.

4. Discussion

Les résultats issus des modèles de régression linéaire présentés dans l'étude ont permis de confirmer partiellement notre hypothèse. En effet, les variables $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$, $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ et $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ ont été sélectionnées pour faire partie de nos modèles de régression linéaire à chaque vitesse quelle que soit la méthode itérative utilisée. En outre, la grande qualité du modèle de régression linéaire final (R_{aj}^2 : 0.80, 0.67, 0.62) a permis de montrer qu'il est possible de bien prédire le DF avec peu de variables aux trois vitesses (9, 11, 13 km/h). De plus, les variables liées au pied et au CI semblent être les plus corrélées au DF. L'exploration via l'ACP a permis de mettre en évidence que la corrélation entre la variance présente dans nos données et le DF est considérablement inférieure à la corrélation entre notre modèle de régression linéaire final et le DF peu importe la vitesse de course. Les ACP semblent également indiquer que les variables cinématiques (spatiales et angulaires) issues du pied, de la cheville et du genou au CI sont celles qui sont le plus reliées au DF et donc qui expliquent le plus la variabilité de ce dernier.

Les trois variables qui viennent confirmer notre première hypothèse ($\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$, $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ et $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$) confirment les recherches qui nous avaient conduites à penser qu'elles étaient reliées au DF. En effet, Di Michele et Merni (2014) et Patoz et collaborateurs (2020) avaient respectivement montré l'influence de $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ sur le t_c et le DF, un $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ petit impliquant un t_c court et un DF bas et inversement. $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ fait également parti de l'échelle Volodalen qui comprend aussi $d_{\text{pied-pelvis}}^{\text{CI}}$. L'étude de Patoz et collaborateurs (2019) utilisant cette échelle avait montré qu'il était possible de répartir les sujets dans les groupes DF (bas/élevé) avec 79.8% de précision en se basant uniquement sur l'observation des variables faisant partie de l'échelle Volodalen. La présence de ces deux variables dans notre modèle de régression final tant ainsi à donner une crédibilité additionnelle à nos résultats et à cette échelle pour prédire le DF. Finalement, l'étude de Patoz et collaborateurs (2020) a montré que la flexion des membres inférieurs était plus grande chez les individus possédant un DF élevé que pour ceux ayant un DF bas durant le t_c . Ainsi, la présence de $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ dans notre modèle de régression linéaire final semble aller dans le même sens que cette étude, du moins pour ce qui concerne la partie au MA de cette différence d'angle. De plus, cette même étude indique une différence au niveau de la propulsion en fonction du DF. Il est donc possible que ces deux éléments représentent une partie des liens entre $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ et le DF.

L'âge et $\Delta\theta_{\text{Hanche}}^{\text{CI-MA}}$, ont fait partie des 11 variables qui ont été sélectionnées au moins une fois par les algorithmes de sélection. Dans le cas de l'âge, la variable a même été retenue cinq fois sur six (Tableau 2). Ainsi, il semble que ces deux variables soient tout de même des bons prédicteurs du DF, ce qui coïncide, pour l'âge, avec l'étude de Cavagna et collaborateurs (2008) et pour $\Delta\theta_{\text{Hanche}}^{\text{CI-MA}}$ avec l'étude de Patoz et collaborateurs (2020). Toutefois, parmi les six variables qui constituent le modèle de régression linéaire final expliquant au mieux le DF, trois d'entre elles n'avaient pas été évoquées dans notre hypothèse : $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$, $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$ et la taille. Néanmoins, pour deux d'entre elles, il n'est pas étonnant de les retrouver dans le modèle de régression final. En effet, Patoz et collaborateurs (2020) ont montré que $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CF}}$ est plus important chez les coureurs qui ont un DF élevé que ceux qui ont un DF bas et suggèrent que ceci est causé par la plus grande utilisation des doigts de pieds durant la propulsion de la part des coureurs avec un DF élevé. Pour ce qui est de $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$, il obtient à chaque vitesse de course mesurée une corrélation significative avec $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ (Annexe 1) qui semble être une des variables les plus reliées au DF. Ainsi, il n'est pas surprenant qu'il soit lui aussi un bon prédicteur du DF. En revanche, retrouver la taille dans notre modèle de régression final c'est plus surprenant et inattendu. En effet, bien que celle-ci joue un rôle sur la fréquence de foulée, elle ne semble pas être significativement liée au DF (Patoz et coll. 2021). Cependant, Lussiana et collaborateurs (2019) ont trouvé une corrélation presque significative ($P = 0.06$) entre la taille et le groupe DF (élevé/bas) dans lequel se situait le sujet. En somme, il ne semble pas qu'un lien significatif existe entre le DF et la taille mais il est tout de même probable qu'un lien existe entre ces deux variables si on se base sur cette étude et la présence de la taille dans notre modèle de régression linéaire final.

Intéressons-nous maintenant à la qualité des modèles de régression linéaire formés. Ceux-ci affichent des coefficients de détermination ajustés (R_{aj}^2) compris entre 0.62 et 0.80, indiquant une *forte* corrélation entre nos modèles et le DF (Hinkle et coll, 2002). Ainsi, nous pouvons dire que nos modèles de régression linéaire et notamment notre modèle final (Tableau 3), sont de bons prédicteurs du DF et ceci aux trois vitesses de course étudiées. En ce qui concerne les coefficients des variables dans ces modèles, on constate que $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ est la variable la plus importante à 9 km/h alors que ce sont $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ et $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ qui sont les variables les plus importantes à 11 et 13 km/h. Ce n'est pas une surprise d'observer ces trois variables comme particulièrement importantes dans le modèle de régression linéaire final car ce sont trois variables que nous avons évoquées et justifiées dans notre hypothèse par les études de Di

Michele et Merni (2014) et Patoz et collaborateurs (2020) pour $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ et par Patoz et collaborateurs (2019) pour $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$. En outre, on peut noter que ces variables sont toutes les deux liées à la façon dont le pied est posé au sol lors du CI. Par la présence de $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$ et $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$ dans le modèle final, ainsi que leurs coefficients proches de ceux de $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ et $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$ (Tableau 3), ces deux variables montrent une importance particulière dans la prédiction du DF. De plus, on peut remarquer que celles-ci sont aussi soit reliées au pied soit au CI. Par conséquent, à la vue de ces quatre variables ($\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$, $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$, $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$, $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$) particulièrement importantes dans la l'explication du DF, on peut faire l'hypothèse que le pied est le segment qui permet le mieux de prédire le DF et le CI le moment le plus lié à ce dernier.

La qualité des modèles de régression linéaire ainsi que la valeur des coefficients diminuent avec l'augmentation de la vitesse de course. En effet, la qualité du modèle de régression final passe de 0.80 à 0.67 (-16.3%) de 9 à 11 km/h et de 0.67 à 0.62 (-7.5%) de 11 à 13 km/h. Les coefficients quant à eux ne diminuent pas pour chaque variable. Néanmoins, de manière globale leur baisse est plus marquée que leur augmentation. Pour ce qui est de l'influence de la vitesse sur la qualité des modèles, on peut imaginer que ceci est causé par la variation de l'intervalle de valeur entre lequel est compris le DF. En effet, plus la vitesse de course augmente, plus l'intervalle de valeur du DF diminue. Par conséquent, il est plus difficile de prédire la relation entre les variables et le DF. Cette réduction de l'intervalle de valeur du DF est observable dans nos données ([min, max] ; 9 km/h : [31.5, 45.0] ; 13 km/h : [27.0, 37.9]) avec une diminution de 19.3% de 9 à 13 km/h mais celle-ci est aussi présente dans plusieurs autres études (Lussiana et coll. 2019 ; Gray et coll. 2019). Quant à la diminution des coefficients des différentes variables composant nos modèles avec l'augmentation de la vitesse de course, on peut supposer que ceci est dû en partie à la diminution de l'intervalle de valeur du DF qui rend plus difficile la création de liens forts entre les variables et le DF. De plus, cela peut suggérer que d'autres facteurs comme la condition physique et la coordination peuvent possiblement influencer plus fortement les variables présentes dans les modèles avec l'augmentation de la vitesse et ainsi biaiser leur relation avec le DF.

Nous allons maintenant nous concentrer sur les corrélations obtenues entre les CP qui expliquent la plus grande partie de la variance de nos données et le DF. En effet, bien que l'interprétation des corrélations soit très contextuelle, il est nécessaire que les CP soient au moins significativement corrélées avec le DF pour que l'interprétation des scores de leurs

variables puisse avoir du sens. Dans cette optique, nos résultats montrent que pour toutes les ACP réalisées, la CP1 possède une corrélation significative avec le DF. Le $|r|$ de ces corrélations est compris entre 0.32 et 0.60 à l'exception de deux ACP. En effet, l'ACP réalisée à partir de la méthode de l'indice KMO à 11 km/h contient une CP1 composée de trois variables anthropométriques, deux cinématiques et deux relatives aux chaussures et a obtenu une corrélation de 0.19 avec le DF (Tableau 4), soit bien en dessous des autres ACP. En revanche, la CP1 qui possède la plus forte corrélation avec le DF (0.72) est issue de l'ACP réalisée à 9 km/h à partir des variables du modèle de régression linéaire final composé de cinq variables cinématique et une anthropométrique (Tableau 6). Ainsi, à partir des variables présentes dans ces deux CP1 qui affichent des corrélations avec le DF bien différentes (0.19 et 0.72), il semble que le lien entre les variables anthropométriques et le DF soit plus faible que lien entre les variables cinématiques et le DF. Cette faible relation entre les variables anthropométriques et le DF irait dans le sens de différentes études qui n'ont pas constaté de relation significative entre ce type de variable et le DF (Patoz et coll. 2019 ; Lussiana et coll. 2019 ; Patoz et coll. 2020 ; Patoz et coll. 2021). Au contraire, plusieurs études déjà évoquées précédemment ont montré des liens significatifs entre des variables cinématiques et le DF (Di Michele et Merni, 2014 ; Patoz et coll. 2020 ; Patoz et coll. 2021). De manière plus globale, parmi les neuf ACP que nous avons réalisées dans cette étude, seulement cinq des 27 CP1, CP2 et CP3 ont obtenu une corrélation non significative avec le DF. Néanmoins, il ne semble pas exister de lien linéaire entre la quantité de variance expliquée par une CP et sa corrélation avec le DF. En revanche, on observe que la CP1 a régulièrement la plus grande corrélation avec le DF. De plus, dans le tableau 5, sept des dix CP qui possèdent une corrélation significative avec le DF sont les CP1, CP2 ou CP3. Cela laisse penser qu'il existe tout de même un lien entre la quantité de variance expliquée et le DF bien qu'il ne soit pas proportionnel. On peut encore rajouter à l'analyse des corrélations entre les CP et le DF que la corrélation maximale obtenue entre une CP et le DF diminue avec l'augmentation de la vitesse de course (Tableaux 5 et 6). Ce n'est pas le cas pour le tableau 4, cependant celui-ci est composé principalement de variables anthropométriques à 9 et 11 km/h alors qu'il est majoritairement composé de variables cinématiques à 13 km/h, ce qui joue certainement sur la valeur des corrélations maximales. Ces différents résultats nous montrent que la variance des données est majoritairement corrélée significativement avec le DF, ceci malgré la diminution des corrélations issues de l'augmentation de la vitesse de course. De plus, il semblerait que les variables anthropométriques et reliées aux chaussures sont globalement moins corrélées au DF que les variables cinématiques (Tableau 4). Les résultats

de l'étude de Lussiana et collaborateurs (2019) apportent les mêmes résultats malgré la mise en place de groupes DF (élevé/bas) qui auraient pu aider à obtenir des résultats significatifs.

Nous allons maintenant discuter des scores des variables dans nos différentes ACP afin de mettre en évidence les variables qui possèdent des scores importants tout en tenant compte de la variance expliquée par la CP et de la corrélation entre cette dernière et le DF. A chaque vitesse de course, la CP1 du Tableau 5 fait principalement ressortir les variables cinématiques spatiales et angulaires suivantes : $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$, $\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CI}}$, $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$, $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI-MA}}$, $\Delta\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CI-MA}}$, $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI-MA}}$. Celles-ci, à une exception près, sont toutes liées au pied et à la cheville au CI ou du CI au MA. Ce groupe de variables est issu de différentes CP1 qui expliquent entre 17 et 21% de la variance des données et ont un $|r|$ avec le DF compris entre 0.32 et 0.60. Il semble donc que la variance de ces variables soient associées de manière non négligeable au DF. Cela confirmerait également ce qui a été montré d'une autre façon par Patoz et collaborateurs (2019) lorsqu'ils ont réussi à prédire dans 79.8% des cas le groupe DF (bas/élevé) d'un individu à partir de cinq critères d'observations qui forment l'échelle Volodalen dont trois sont des éléments au moment du CI ($h_{\text{Pelvis}}^{\text{CI}}$, $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$, $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$) et que deux de ces trois concernent aussi le pied. Quant aux scores des autres CP (CP2, CP3, ...), ils nous montrent que différentes dimensions de variables sur lesquelles nous n'avons que peu misé jusqu'à présent sont susceptibles d'expliquer une petite partie de la variabilité du DF pour une certaine vitesse donnée (Tableau 5). Néanmoins, le manque de régularité de leurs scores au travers des différentes vitesses rend difficile l'interprétation de leur lien avec le DF. Finalement, les scores des variables issus des ACP réalisées à partir des variables du modèle de régression linéaire final sont eux aussi difficiles à interpréter (Tableau 6). Il semblerait que différentes directions de la variance de chacune de ces six variables puissent être associées de manière relativement importante au DF en fonction de la vitesse de course. En effet, les corrélations des CP avec le DF sont pour six des neuf (CP1, CP2 et CP3 aux trois vitesses de course) supérieures à 0.3 en valeur absolue avec des pourcentage de variance expliquée compris entre 17 et 32%. En somme, la variance contenue dans toutes ces variables est susceptible d'être reliée en partie au DF mais il est difficile d'identifier si l'une d'entre elles joue un plus grand rôle que les autres dû au manque de régularité des scores aux différentes vitesses de course et sur les différentes CP.

Nous allons maintenant comparer nos résultats obtenus via les modèles de régression linéaire et les ACP. Le modèle de régression linéaire final a montré une *forte* corrélation avec le DF en obtenant les valeurs de R_{aj}^2 suivantes : 0.80 à 9 km/h, 0.67 à 11 km/h et 0.62 à 13 km/h (Tableau

3). Les résultats obtenus à partir de l'ACP menée sur les variables de ce modèle final montrent des corrélations entre les CP et le DF bien inférieures qu'avec l'utilisation de la régression linéaire (Tableau 6). En effet, les $|r|$ maximaux obtenus de 9 à 13 km/h entre une PC et le DF sont respectivement de 0.73, 0.58 et 0.46, ce qui donne des R^2 de respectivement 0.53, 0.34 et 0.21. Ainsi, on constate tout de même que la combinaison de ces six variables est en partie associée au DF, mais d'une moindre façon que les modèles de régression linéaire. La totalité des ACP que nous avons réalisées ont confirmé cette tendance. Une autre tendance, observable aussi bien dans les résultats des modèles de régression que dans ceux des ACP, est la baisse des corrélations avec le DF avec l'augmentation de la vitesse de course. Ainsi, il semble à la fois plus difficile de prédire le DF avec des modèles de régression linéaire mais aussi d'associer la variance des données avec ce dernier en utilisant l'ACP lorsque la vitesse de course augmente. Une possible explication à ce phénomène pourrait être la diminution de l'intervalle des valeurs du DF en lien avec l'augmentation de la vitesse de course (Lussiana et coll. 2019).

L'utilisation des algorithmes de sélection forward et backward ont permis de former un modèle de régression final prédisant avec précision le DF (Tableau 3). La variance des variables qui forment ce modèle a ensuite montré un lien non négligeable avec le DF au travers de nos ACP. Ainsi, ces différents résultats montrent que les variables suivantes sont liées au DF : $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$, $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$, $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{MA-CF}}$, $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$, la taille et $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$. Les résultats des ACP ont également fait émerger l'importance des variables suivantes : $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$, $\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CI}}$, $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$, $\Delta\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI-MA}}$, $\Delta\theta_{\text{Cheville}}^{\text{CI-MA}}$ et $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI-MA}}$ (Tableau 5). Toutefois, il est à noter que de nombreuses variables dont celles de cheville au CI ne pouvait pas faire partie des modèles de régression linéaire car elles possédaient des corrélations fortes à toutes les vitesses avec une ou plusieurs autres variables. En regroupant ces différents résultats, on voit que les variables cinématiques (angulaires et spatiales) de pied et/ou celles au moment du CI se démarquent par leur lien avec le DF à toutes les vitesses. Cela confirme notamment ce qui a été observé dans plusieurs études citées précédemment (Di Michele et Merni, 2014 ; Patoz et coll. 2019 ; Patoz et coll. 2020). De plus, la taille, qui est fortement corrélée à la masse (Annexe 1), apparaît comme la seule variable non-cinématique expliquant le DF de manière non négligeable dans nos résultats. L'âge quant à lui semble relativement bien corrélé au DF dû à sa présence dans les modèles de régression. Ce constat va dans le sens de l'étude de Cavagna et collaborateurs (2008) qui montre que l'âge a une influence sur le t_c et donc directement sur le DF. Cependant, sa variance ne semble que très peu expliqué être associée au DF étant donné ses scores faibles dans les CP expliquant le

plus de variance des données. Finalement, on peut encore évoquer la variable $\Delta\theta_{\text{Genou}}^{\text{MA-CF}}$ présente dans le modèle de régression linéaire final et qui possède un score très important à 9 km/h. Cette même variable a également obtenu le score le plus important parmi toutes nos ACP (0.91 à 9 km/h dans une CP possédant une corrélation de 0.44 avec le DF et qui explique 11.7% de la variance des données). Ainsi, elle semble valider sa forte corrélation avec le DF et la relation de sa variance avec le DF à 9 km/h. Cet élément est en adéquation avec l'étude de Patoz et collaborateurs (2020) qui a montré que la flexion des membres inférieurs est plus importante pour les individus qui possèdent un DF élevé et qu'il existe une différence au niveau de la propulsion en fonction du DF.

Lors de la réalisation de cette étude, plusieurs limites ont été rencontrées. La plus importante d'entre elle est la difficulté à interpréter les résultats des ACP et d'en sortir des éléments quantifiables. En effet, il n'est pas aisé d'attribuer une signification à un groupe de variables hétérogènes qui possèdent des scores importants de manière redondante aux différentes vitesses de course. De plus, même lorsque des variables ou un groupe de variables sont identifiés comme possédant une variance en partie définie par le DF, il est extrêmement difficile de quantifier à quel point le lien entre ces variables et le DF est grand. Deuxièmement, et en lien avec cette première limite, l'absence de travaux réalisés sur le sujet avec cette démarche ne permet pas de confirmer ou d'infirmer scientifiquement nos résultats ni de comparer notre méthode d'analyse de ces derniers. Par conséquent, la partie du travail portant sur le lien entre la variance des données et le DF à travers l'utilisation de l'ACP est très exploratoire. Plus spécifiquement, la qualité de nos résultats diminue à mesure que la vitesse augmente. Il serait intéressant de prendre des mesures à des vitesses plus élevées (e.g., 15 et 17 km/h) afin de voir si la qualité des résultats continue de baisser ou si à partir d'un certain palier la qualité de prédiction du DF et le lien entre la variance des données et le DF se stabilise. Finalement, même si l'âge a semblé être une variable relativement reliée au DF, ce qui coïncide avec l'étude de Cavagna et collaborateurs (2008), le faible nombre de sujets âgés de plus de 40 ans (30.2 ± 7.5 ans) n'a peut-être pas permis à cette variable d'exprimer davantage sa relation avec le DF. Ainsi, il serait intéressant de recruter des sujets d'un âge plus varié pour mieux étudier le lien entre cette variable et le DF.

5. Applications pratiques

Les résultats de notre étude peuvent avoir diverses applications pratiques, notamment dans le domaine de l'éducation physique scolaire, tant au niveau éducatif que moteur. En effet, parmi les variables qui sont apparues comme les plus reliées au DF, nous pensons que $d_{\text{Pied-Pelvis}}^{\text{CI}}$, $\theta_{\text{Pied}}^{\text{CI}}$ et $\theta_{\text{Genou}}^{\text{CI}}$ sont trois des plus faciles à observer. Ainsi, dans le cadre d'une leçon d'un cycle d'enseignement en course à pied, les élèves pourraient être capable d'observer ces variables eux-mêmes par vidéo grâce aux arrêts sur image et aux ralentis. Il serait donc possible, après que le maître ait montré comment réalisé l'analyse de ces variables, de former des petits groupes d'élèves munis d'une tablette et de leur demander de co-évaluer le DF de leurs camarades en se basant uniquement sur ces trois variables. Cet exercice, en plus de participer au développement des capacités transversales comme la collaboration et la communication, permettrait également de contribuer à l'éducation numérique des élèves promue par le plan d'étude romand. De plus, cette activité participerait à la transmission de la culture sportive, l'analyse vidéo étant un outil toujours plus utilisé dans le domaine sportif. En conclusion, cet atelier, par la coopération des membres du groupe dans l'analyse de ces variables et par l'acquisition culturelle que représente l'utilisation de l'analyse vidéo, permettrait d'une façon ludique de travailler sur des compétences sociales et culturelles en course à pied, tout en pouvant faire émerger chez certains élèves de l'intérêt pour cette discipline parfois connotée comme difficile et solitaire dans leur imaginaire.

A partir de l'évaluation du DF de chaque élève qui a été réalisée en groupe sur la base des trois variables, il est possible d'envisager une individualisation dans les consignes lors de la suite de la leçon et du cycle d'enseignement en course à pied. En effet, pour les élèves qui ont un DF particulièrement importants, on peut imaginer leur proposer des exercices d'école de course visant à leur faire expérimenter la pose de pied à plat, par l'avant pied ou encore à leur faire poser le pied davantage proche de leur centre de gravité lors du CI ceci non pas dans le but de gagner en efficacité mais avec pour objectif de sensibiliser les élèves à d'autres solutions motrices tout en développant leur bagage moteur. Dans ce même but, les élèves dont le DF a été évalué comme bas pourraient se voir proposer différents exercices leur permettant d'expérimenter la pose de pied par le talon, une pose de pied plus éloignée de leur centre de gravité lors du CI ou encore de se voir naturellement limiter leur oscillation verticale via l'utilisation d'une contrainte comme le port d'un gilet lesté par exemple. Finalement, les élèves avec un DF évalué comme moyen pourraient essayer les deux types d'exercices afin de se

familiariser avec ces différentes solutions motrices. En conclusion, en plus du développement global du bagage moteur des élèves, ces exercices, grâce à la découverte de nouvelles solutions motrices qu'ils engendrent, permettront peut-être à certains élèves de développer de manière naturelle un nouveau pattern de course plus efficient.

6. Conclusion

En résumé, grâce à l'utilisation de modèles de régression linéaire et à l'ACP, nous avons réussi à identifier deux groupes de variables qui apparaissent comme ceux qui expliquent le mieux le DF mais aussi comme ceux dont la variance des données est la plus associée au DF à 9, 11 et 13 km/h. En effet, notre modèle de régression linéaire final composé de six variables, dont quatre sont liées au moment du CI et/ou au pied, a permis d'expliquer le DF avec une bonne précision aux différentes vitesses (R_{aj}^2 : 0.80, 0.67, 0.62). Les ACP quant à elles, ont permis d'identifier que les variables cinématiques (spatiales et angulaires) liées au CI, notamment au niveau du pied, de la cheville et du genou sont celles qui ont la variance la plus associée au DF. Ainsi, en confrontant les résultats de ces deux méthodes, il semble que les variables liées au CI et/ou au pied soient les plus liées au DF. En revanche, les variables anthropométriques, d'entraînements et des chaussures ne semblent pas avoir de liens particuliers avec le DF. Ces constats vont dans le sens de l'étude de Patoz et collaborateurs (2019) qui a montré qu'il est possible de prédire le groupe DF (bas/élevé) d'un individu dans 79.8% des cas à partir de cinq critères d'observations dont deux sont liées au CI et au pied et un au CI uniquement. Néanmoins, nos résultats montrent que nos variables sont de moins en moins liées au DF lorsque la vitesse augmente entre 9 et 13 km/h. Il faut également noter que le lien entre la variance des données et le DF, même pour les variables dont la variance a été identifiée comme particulièrement associée au DF, est beaucoup plus faible que le lien illustré par le modèle de régression final.

7. Annexes

Matrices des corrélations à 9, 11 et 13 km/h : <https://github.com/aurelienPatoz/deciphering-duty-factor-using-LR-and-PCA>

8. Bibliographie

8.1. Articles

- Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis : Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4), 433-459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- Alexander, R. McN. (1980). Optimum walking techniques for quadrupeds and bipeds. *Journal of Zoology*, 192(1), 97-117. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1980.tb04222.x>
- Altman, A. R., & Davis, I. S. (2012). A kinematic method for footstrike pattern detection in barefoot and shod runners. *Gait & Posture*, 35(2), 298-300. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.09.104>
- Beck, O. N., Gosyne, J., Franz, J. R., & Sawicki, G. S. (2020). Cyclically producing the same average muscle-tendon force with a smaller duty increases metabolic rate. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287(1933), 20200431. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0431>
- Bonnaerens, S., Fiers, P., Galle, S., Derie, R., Aerts, P., Frederick, E., Kaneko, Y., Derave, W., De Clercq, D., & Segers, V. (2021). Relationship between duty factor and external forces in slow recreational runners. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 7(1), e000996. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2020-000996>
- Braga, U. M., Mendonça, L. D., Mascarenhas, R. O., Alves, C. O. A., Filho, R. G. T., & Resende, R. A. (2019). Effects of medially wedged insoles on the biomechanics of the lower limbs of runners with excessive foot pronation and foot varus alignment. *Gait & Posture*, 74, 242-249. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.023>
- Brughelli, M., Cronin, J., & Chaouachi, A. (2011). Effects of Running Velocity on Running Kinetics and Kinematics. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(4), 933-939. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181c64308>
- Cavagna, G. A., Legramandi, M. A., & Peyré-Tartaruga, L. A. (2008). Old men running : Mechanical work and elastic bounce. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 275(1633), 411-418. <https://doi.org/10.1098/rspb.2007.1288>
- Chambon, N., Delattre, N., Guéguen, N., Berton, E., & Rao, G. (2014). Is midsole thickness a key parameter for the running pattern? *Gait & Posture*, 40(1), 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.02.005>
- Cole, G. K., Nigg, B. M., Ronsky, J. L., & Yeadon, M. R. (1993). Application of the Joint Coordinate System to Three-Dimensional Joint Attitude and Movement Representation : A Standardization Proposal. *Journal of Biomechanical Engineering*, 115(4A), 344-349. <https://doi.org/10.1115/1.2895496>
- Deluzio, K. J., Wyss, U. P., Zee, B., Costigan, P. A., & Serbie, C. (1997). Principal component models of knee kinematics and kinetics : Normal vs. pathological gait patterns. *Human Movement Science*, 16(2-3), 201-217. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(96\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(96)00051-6)
- Di Michele, R., & Merni, F. (2014). The concurrent effects of strike pattern and ground-contact time on running economy. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 17(4), 414-418. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.05.012>
- Fihl, P., & Moeslund, T. B. (2007). Classification of gait types based on the duty-factor. *2007 IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, 318-323. <https://doi.org/10.1109/AVSS.2007.4425330>
- Firminger, C. R., & Edwards, W. B. (2016). The influence of minimalist footwear and stride length reduction on lower-extremity running mechanics and cumulative loading. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 19(12), 975-979. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2016.03.003>

- Folland, J. P., Allen, S. J., Black, M. I., Handsaker, J. C., & Forrester, S. E. (2017). Running Technique is an Important Component of Running Economy and Performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 49(7), 1412-1423. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001245>
- Gindre, C., Lussiana, T., Hebert-Losier, K., & Mourot, L. (2015). Aerial and Terrestrial Patterns : A Novel Approach to Analyzing Human Running. *International Journal of Sports Medicine*, 37(01), 25-26. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1555931>
- Gray, A., Price, M., & Jenkins, D. (2021). Predicting Temporal Gait Kinematics From Running Velocity. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(9), 2379-2382. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003198>
- Hanavan, E. P. (1964). A MATHEMATICAL MODEL OF THE HUMAN BODY. AMRL-TR-64-102. AMRL-TR. Aerospace Medical Research Laboratories (U.S.), 1-149.
- Kaiser, H. F. (1961). A NOTE ON GUTTMAN'S LOWER BOUND FOR THE NUMBER OF COMMON FACTORS1. *British Journal of Statistical Psychology*, 14(1), 1-2. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8317.1961.tb00061.x>
- Lamprecht, Markus, Bürgi, Rahel et Stamm, Hanspeter (2020) : *Sport Suisse 2020. Activité et consommation sportives de la population suisse*. Macolin : Office fédéral du sport OFSPO.
- Lepoutre, J. P. (2007). Modélisation biomécanique du mouvement : vers un outil d'évaluation pour l'instrumentation en orthopédie (Doctoral dissertation, Université du Sud Toulon Var).
- Lussiana, T., Patoz, A., Gindre, C., Mourot, L., & Hébert-Losier, K. (2019). The implications of time on the ground on running economy : Less is not always better. *Journal of Experimental Biology*, jeb.192047. <https://doi.org/10.1242/jeb.192047>
- Minetti, A. E. (1998). A model equation for the prediction of mechanical internal work of terrestrial locomotion. *Journal of Biomechanics*, 31(5), 463-468. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(98\)00038-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(98)00038-4)
- Osis, S. T., Hettinga, B. A., Leitch, J., & Ferber, R. (2014). Predicting timing of foot strike during running, independent of striking technique, using principal component analysis of joint angles. *Journal of Biomechanics*, 47(11), 2786-2789. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.06.009>
- Patoz, A., Gindre, C., Thouvenot, A., Mourot, L., Hébert-Losier, K., & Lussiana, T. (2019). Duty Factor Is a Viable Measure to Classify Spontaneous Running Forms. *Sports*, 7(11), 233. <https://doi.org/10.3390/sports7110233>
- Patoz, A., Lussiana, T., Gindre, C., & Mourot, L. (2021). Predicting Temporal Gait Kinematics : Anthropometric Characteristics and Global Running Pattern Matter. *Frontiers in Physiology*, 11, 625557. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.625557>
- Patoz, A., Lussiana, T., Thouvenot, A., Mourot, L., & Gindre, C. (2020). Duty Factor Reflects Lower Limb Kinematics of Running. *Applied Sciences*, 10(24), 8818. <https://doi.org/10.3390/app10248818>
- Piazza, S. J., & Cavanagh, P. R. (2000). Measurement of the screw-home motion of the knee is sensitive to errors in axis alignment. *Journal of Biomechanics*, 33(8), 1029-1034. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(00\)00056-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00056-7)
- Pustoc'h, A. (2007). *Élaboration d'un modèle mécanique de l'articulation de la hanche sous sollicitations dynamiques : application à l'étude de l'influence d'une orthèse podale sur une hanche arthrosique* (Doctoral dissertation, Lyon 1).
- Ringné, M. (2008). What is principal component analysis? *Nature Biotechnology*, 26(3), 303-304. <https://doi.org/10.1038/nbt0308-303>

- Sinclair, J., Hebron, J., Hurst, H., & Taylor, P. (2013). The influence of different Cardan sequences on three-dimensional cycling kinematics. *Human Movement*, 14(4). <https://doi.org/10.2478/humo-2013-0040>
- Subotnick, S. I. (1985). The Biomechanics of Running : Implications for the Prevention of Foot Injuries. *Sports Medicine*, 2(2), 144-153. <https://doi.org/10.2165/00007256-198502020-00006>
- Woltring, H. J. (1991). Representation and calculation of 3-D joint movement. *Human Movement Science*, 10(5), 603-616. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(91\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0167-9457(91)90048-3)
- Wu, G., Siegler, S., Allard, P., Kirtley, C., Leardini, A., Rosenbaum, D., Whittle, M., D'Lima, D. D., Cristofolini, L., Witte, H., Schmid, O., & Stokes, I. (2002). ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion—part I : Ankle, hip, and spine. *Journal of Biomechanics*, 35(4), 543-548. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(01\)00222-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(01)00222-6)

8.2. Livres

- Dempster, WT. (1995). *Space requirements of the seated operator: geometrical, kinematic, and mechanical aspects of the body with special reference to the limbs*. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Wright Air Development Center.
- Hinkle, D. E., Wiersma, W., et Jurs, S. G. (2002). *Applied statistics for the behavioral sciences*. 5nd ed. Boston: Houghton Mifflin
- Robertson, D. G. E., Caldwell, G. E., Hamill, J., Kamen, G., & Whittlesey, S. (2014). *Research methods in biomechanics*. Human kinetics.

8.3. Site

- Glen, S. (2016). *Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) Test for Sampling Adequacy*. StatisticsHowTo : Elementary Statistics for the rest of us! Consulté le 28.05.2022 sur <https://www.statisticshowto.com/kaiser-meyer-olkin/>