



HAL
open science

Développement d'une méthode expérimentale d'usure de chaussures

Elliot Polomé

► **To cite this version:**

Elliot Polomé. Développement d'une méthode expérimentale d'usure de chaussures. Biomécanique [physics.med-ph]. Université de Lyon, 2022. Français. NNT : 2022LYSE1102 . tel-04112078

HAL Id: tel-04112078

<https://theses.hal.science/tel-04112078>

Submitted on 31 May 2023

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

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

N°d'ordre NNT :2022LYSE1102



THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
l'Université Claude Bernard Lyon 1

Ecole Doctorale N° 162
(MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE)

Spécialité de doctorat : Mécanique
Discipline : Biomécanique

Soutenue publiquement le 21/06/2022, par :
Elliot Polomé

**Développement d'une méthode
expérimentale d'usure de chaussures**

Devant le jury composé de :

Simoneau-B., Emilie, Professeure des Universités (UPHFV)
Colloud, Floren, Professeur des Universités (AMPT)
Rao, Guillaume, Maître de Conférence (AMU)
Rogowski, Isabelle, Maître de Conférence (UCBL1)
Cheze, Laurence, Professeure des Universités (UCBL1)
Robert, Thomas, Chargé de Recherche (UGE)
Dumas, Raphaël, Directeur de Recherche (UGE)
Théveniau, Nicolas, Chef de projet (CTC Groupe)

Rapporteuse
Rapporteur
Examinateur
Examinatrice
Présidente du jury
Directeur de thèse
Co-directeur de thèse
Invité

Liste de publications et participation aux conférences

1) Liste des publications réalisées dans le cadre du projet de thèse :

1. E. Polomé, N. Théveniau, C. Vigier, R. Dumas & T. Robert (2020) Influence of different footwear on mediolateral stability during gait at different speeds in healthy people, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 23:sup1, S226-S228, DOI: 10.1080/10255842.2020.1815318
2. C. Vigier, J. F. Chauvin, E. Polomé, N. Théveniau, & V. Louis (2020) Mechanical Walking and Running Simulator, FR20190005853 20190603
3. E. Polomé, N. Théveniau, C. Vigier, R. Dumas & T. Robert (2022). Shoe wear test machine: what exists vs. innovations and promising concepts. A scoping review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology* (article soumis à publication)

2) Participation aux conférences au cours de la période de thèse :

1. Présentation orale : Polomé, E., N. Théveniau, C. Vigier, R. Dumas, et T. Robert. 2020. « Influence of different footwear on mediolateral stability during gait at different speeds in healthy people ». 45^{ème} Congrès de la Société de Biomécanique. France, Metz (virtuel).
2. Présentation poster : Polomé, E., N. Théveniau, C. Vigier, R. Dumas, et T. Robert. 2021. « Effect of the wear of city shoes on the variables characterizing the foot / ground interaction ». 28^{ème} Congress of the International Society of Biomechanics. Suède, Stockholm (virtuel).

Résumé

L'usure des chaussures est due à une multitude de facteurs (humain, environnemental, physique, etc.) que les industriels essaient de recréer par le biais de tests afin de déterminer les performances (durabilité, amorti, stabilité, etc.), le confort et la sécurité de leur produit. Les tests utilisés peuvent être réalisés à l'aide de testeurs humains dans des conditions écologiques (test « au porté ») mais peuvent aussi être réalisés à l'aide de bancs de test physique (test en laboratoire physique) ou à l'aide de modèles sur ordinateur (test virtuel). Cependant, ces différentes catégories de tests ne permettent pas de recréer une usure fidèle des chaussures car le test est souvent trop éloigné de la réalité et ne soumet pas la chaussure à des conditions de chargement réalistes hormis pour les tests « au porté », qui cependant restent une solution complexe et très longue à mettre en place. L'objectif de cette thèse est de développer une méthode expérimentale d'usure de chaussures par le biais de la mise au point d'une machine spéciale de test des produits chaussants permettant d'imiter la phase de contact du pied par rapport au sol. Une attention particulière a été portée sur la reproduction de la cinématique et de la dynamique de l'interaction entre le pied et le sol. Un état de l'art sur les machines existantes reproduisant la phase de contact du pied avec le sol, de l'attaque du pied au décollage des orteils a permis d'identifier les mécanismes et concepts de pilotage utilisés dans la littérature et a mis en évidence la difficulté à reproduire des interactions pieds/sol bio-fidèles. Une étude "au porté" contrôlée, avec des testeurs volontaires a été menée afin d'évaluer la manière dont les propriétés mécaniques des chaussures se dégradent au cours de leur usage et l'impact de ces dégradations sur la cinématique et la dynamique de la marche des testeurs. Ces travaux ont permis de réaliser et de documenter la toute première simulation mécanique d'usure d'une chaussure de ville par le biais d'une machine reproduisant la phase d'appui du pied pour une activité de marche. Ces résultats ont pu être comparés à ceux des tests « au porté ». Enfin, une méthode de génération de trajectoires de pilotage a été proposée et testée, afin de pouvoir simuler mécaniquement des activités de marche et de course à pied pour différentes attaques et allures de déplacement.

Abstract

Shoe wear is due to a multitude of factors (human, environmental, physical, etc.) that manufacturers try to recreate through testing to determine performance (durability, cushioning, stability, etc.), comfort and safety of their product. The tests used can be carried out using human testers under ecological conditions ("wearable" test) but can also be carried out using physical test benches (physical laboratory test) or using models on computer (virtual test). However, these different categories of tests do not make it possible to recreate faithful wear of the shoes because the test is often too far from reality and does not subject the shoe to realistic loading conditions except for the "worn" tests which however remains a complex and very long solution to implement. The objective of this thesis is to develop an experimental method of shoe wear through the development of a special machine for testing footwear products to imitate the contact phase of the foot with respect to the ground. Particular attention has been paid to the reproduction of the kinematics and dynamics of the interaction between the foot and the ground. A state of the art on existing machines reproducing the phase of contact of the foot with the ground, from the attack of the foot to the take-off of the toes has shown that the reproduction of the movement could be complex depending on the mechanism of the machine and how the piloting is done. A study on the way in which the mechanical properties of shoes degrade during their use and the impact of these degradations on the kinematics and dynamics of the gait of human testers was conducted. This work made it possible to carry out and document the very first mechanical simulation of the wear of a city shoe by means of a machine reproducing the support phase of the foot for a walking activity. To our knowledge, no mechanical simulation had yet been reported in the literature to date. These results could be compared with those of the "wearable" tests. In order to be able to mechanically simulate walking and running activities for different attacks and gaits of movement, a method for generating steering trajectories has been proposed and tested.

Remerciements

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé pendant l'élaboration de ma thèse.

Un grand merci à vous, mon directeur de thèse Thomas Robert et mon codirecteur Raphaël Dumas, pour ces années passées en votre compagnie. Je suis ravi d'avoir travaillé avec vous car outre l'appui scientifique, vous avez toujours été là pour m'aider et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse. Merci pour votre soutien infaillible lors de la rédaction de ce manuscrit !

Je remercie l'entreprise CTC Groupe pour le financement de cette thèse CIFRE.

J'adresse tous mes remerciements à David Mitton, Directeur du Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs, pour son accueil au sein de l'équipe de recherche.

Je tiens également à remercier les membres de mon jury : mes rapporteurs Madame Emilie Simoneau-Buessinger et Monsieur Floren Colloud, la présidente du jury Madame Laurence Cheze ainsi que les examinateurs Madame Isabelle Rogowski et Monsieur Guillaume Rao.

Je remercie en particulier Guillaume Rao pour l'honneur qu'il m'a fait d'être dans mon jury de thèse. Je garde un excellent souvenir de nos années de travail lorsque j'étais étudiant à Marseille.

Merci à tous les chercheurs, le personnel et les étudiants du Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs, pour l'esprit d'entraide et d'entente qui règne au sein du laboratoire.

Je remercie enfin celles et ceux qui me sont chers. Leurs attentions et encouragements m'ont accompagné tout au long de ces années.

Table des matières

Liste de publications et participation aux conférences	I
Résumé	II
Abstract	III
Remerciements	IV
Table des matières	V
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XIII
Chapitre 1 : Introduction	1
1.1. Objectifs de la thèse et questions de recherche	1
1.2. Structure de la thèse	4
Chapitre 2 : Expérimentation d'usure « au porté »	6
2.1. Introduction	6
2.1.1. Contexte	6
2.1.2. Objectifs	9
2.2. Méthode	9
2.2.1. Sujets	9
2.2.2. Équipement	9
2.2.3. Procédure	12
2.2.4. Analyse	13
2.3. Résultats	16
2.3.1. Nombre de pas réalisés et temps de vieillissement effectué	16
2.3.2. Analyse des tests physiques	18
2.3.3. Analyse de la marche à 3 km/h	18
2.3.4. Analyse de la marche à 5 km/h	19
2.4. Discussion	21
2.4.1. Nombre de pas et temps de vieillissement	21
2.4.2. Vieillissement des propriétés mécaniques des chaussures	21
2.4.3. Effet du vieillissement de la chaussure sur la biomécanique de la marche	22
2.5. Conclusion	24
Chapitre 3 : Simulateurs mécaniques imitant la phase de contact du pied avec le sol	25
3.1. Revue de littérature sur les simulateurs existants	25
3.1.1. Introduction	25
3.1.2. Scoping review (Shoe wear test machine: what exists vs. innovations and promising concepts)	25
3.1.3. Bilan et choix de conception pour le simulateur	39

3.2.	Simulateur mécanique de CTC	40
3.2.1.	Introduction	40
3.2.2.	Spécifications machine	41
3.2.3.	Pilotage machine	45
3.2.4.	Modèle cinématique de la machine	48
3.2.5.	Caractérisation des éléments compliant	58
3.3.	Conclusion	68
Chapitre 4 : Tests de simulation mécanique d'usure pour une activité de marche		69
4.1.	Introduction	69
4.1.1.	Contexte	69
4.1.2.	Objectifs	69
4.2.	Méthode	70
4.2.1.	Equipement	70
4.2.2.	Trajectoire de pilotage du simulateur mécanique	71
4.2.3.	Procédure	72
4.2.4.	Analyse	72
4.3.	Résultats	75
4.3.1.	Analyse descriptive	75
4.3.2.	Bio-fidélité et répétabilité de la simulation mécanique	76
4.3.3.	Usure du produit chaussant au cours du test	81
4.4.	Discussion	85
4.4.1.	Bio-fidélité et répétabilité de la simulation mécanique	85
4.4.2.	Usure du produit chaussant au cours de la simulation	87
4.4.3.	Utilisation du simulateur	88
4.5.	Conclusion	89
Chapitre 5 : Génération de trajectoires de pilotage du simulateur mécanique		90
5.1.	Introduction	90
5.1.1.	Contexte	90
5.1.2.	Objectifs	90
5.2.	Stratégie de pilotage	91
5.2.1.	Principe	91
5.2.2.	Contraintes de la conception machine	91
5.2.3.	Stratégie utilisée	93
5.3.	Tests	98
5.3.1.	Méthode	98
5.3.2.	Résultats	99
5.4.	Conclusion	103
Chapitre 6 : Conclusion		108
6.1.	Principaux résultats	108
6.1.1.	Question 1	108
6.1.2.	Question 2	109

6.1.3. Question 3	109
6.2. Perspectives de recherche	110
6.2.1. Compléter les tests d'usure	110
6.2.2. Améliorer le pilotage du simulateur	111
6.2.3. Améliorer et caractériser l'effecteur final	111
6.2.4. Caractériser le lien entre la bio-fidélité de la trajectoire de pilotage et l'usure	112
Bibliographie	113

Liste des figures

<i>Figure 1 : Exemple de tests physiques recommandés en chaussure.</i>	<i>2</i>
<i>Figure 2 : Exemple des travaux de Ronkainen et al. (2010), illustrant la simulation mécanique, de l'ensemble de la phase contact du pied avec le sol, réalisée par une machine (partie supérieure) comparée à un testeur humain (partie inférieure) réalisant de la course à pied avec une attaque talon.....</i>	<i>3</i>
<i>Figure 3 : Schéma de l'interaction entre les chapitres de la thèse et leur lien avec chaque question de recherche individuelle.</i>	<i>5</i>
<i>Figure 4 : Podomètre fixé sur la chaussure Adidas Stan Smith.</i>	<i>10</i>
<i>Figure 5 : Position des 16 marqueurs sur le corps du participant utilisés lors de l'expérimentation.</i>	<i>11</i>
<i>Figure 6 : Position des 8 marqueurs sur la chaussure du participant utilisés lors de l'expérimentation.</i>	<i>11</i>
<i>Figure 7 : A gauche (A), test de flexibilité longitudinale en flexion et à droite (B), test de coefficient de transfert.</i>	<i>12</i>
<i>Figure 8 : Schéma de l'évolution de la force verticale à 3 km/h montrant les variables relevées.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 9 : Schéma de l'évolution de la force antéro-postérieure à 3 km/h montrant les variables relevées.</i>	<i>14</i>
<i>Figure 10 : Méthode pour calculer l'angle d'attaque du pied au sol, le point rouge représentant le point moyen situé entre le marqueur du 1^{er} et le 5^{ème} métatarsien.</i>	<i>16</i>
<i>Figure 11 : Boîte à moustache représentant (A) le nombre de jours de vieillissement (B) le nombre de pas réalisé par les sujets durant l'expérience d'usure avec en bleu le nombre de pas après 30 jours d'usure et en rouge le nombre de pas.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 12 : PRISMA flow diagram.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 13 : Schéma du simulateur mécanique de marche et de course pied (vue de face).</i>	<i>41</i>
<i>Figure 14 : Schéma du premier système de déplacement du pied du simulateur de marche et course à pied.</i>	<i>42</i>

<i>Figure 15 : Schéma du second système de déplacement du pied du simulateur de marche et course à pied.</i>	<i>43</i>
<i>Figure 16 : Prothèse Pro-Flex XC et revêtement de pied anatomique de la société Össur.</i>	<i>44</i>
<i>Figure 17 : Architecture de la chaîne d'acquisition de données de la plateforme de force.</i>	<i>45</i>
<i>Figure 18 : Exemple de fichier de point de pilotage envoyé à l'IHM.</i>	<i>46</i>
<i>Figure 19 : Schéma de la partie haute du simulateur mécanique durant la phase de contact du pied avec le sol avec : en haut à gauche, le machine dans la position minimale de départ ; en bas à gauche, la machine dans la position maximale de fin ; à droite, un exemple de fichier de point de pilotage.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 20 : Schéma de la partie haute du simulateur mécanique durant la phase de vol du pied avec : en haut à gauche, le machine dans la position minimale de départ ; en bas à gauche, la machine dans la position maximale de fin ; à droite, un exemple de fichier de point de pilotage.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 21 : Schéma de la représentation du modèle géométrique.</i>	<i>50</i>
<i>Figure 22 : Schéma représentant l'ordre d'utilisation des matrices de transfert permettant de passer de données issues du repère du tapis roulant à un repère machine.</i>	<i>54</i>
<i>Figure 23 : Exemple de cinématique d'un pas durant la phase de contact du pied avec le sol pour la marche à 3 km/h observée lors des expérimentations « au porté » : (A) dans le repère laboratoire, (B) dans le repère tapis (C) dans le repère machine.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 24 : Exemple de cinématique d'un pas durant la phase de vol du pied avec le sol pour la marche à 3 km/h observée lors des expérimentations « au porté » : (A) dans le repère laboratoire, (B) dans le repère tapis (C) dans le repère machine.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 25 : Exemple de résultats de la transformation des données issues des tests « au porté » dans le repère du simulateur mécanique de marche et de course à pied pour la phase de contact du pied avec le sol (figure du haut) et pour la phase de vol du pied (figure du bas).</i>	<i>57</i>
<i>Figure 26 : Illustration des quatre positions d'orientation de l'effecteur final (prothèse + chaussure ou forme rigide) par rapport au sol.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 27 : Données de pilotage du système de la crémaillère pour les 4 vitesses de montée et les 2 niveaux d'enfoncement (en trait plein, le niveau d'enfoncement de 50 mm et en trait pointillé, le niveau d'enfoncement de 100 mm).....</i>	<i>59</i>

Figure 28 : Exemple de résultats des courbes de la force verticale en fonction du temps (en rouge) avec les données : de déplacement du système crémaillère (en bleu), de déplacement du système pneumatique (en violet) et de régulation de la pression du système pneumatique (en vert) pour (A), la condition avec positions d'orientation en attaque talon de la prothèse + chaussure avec une pression de 2000 mbar, un enfoncement de 50 mm et une vitesse de montée de 600 m/s et pour (B), les mêmes réglages mais avec cette fois un enfoncement de 100 mm..... 61

Figure 29 : Exemple de résultats des courbes de la force verticale en fonction du temps (en rouge) avec les données : de déplacement du système crémaillère (en bleu), de déplacement du système pneumatique (en violet) et de régulation de la pression du système pneumatique (en vert) pour (A), la condition avec positions d'orientation en attaque talon de la prothèse + chaussure avec une pression de 4000 mbar, un enfoncement de 50 mm et une vitesse de montée de 200 m/s et pour (B), les mêmes réglages mais avec cette fois un enfoncement de 100 mm..... 62

Figure 30 : Résultats des données du pic de la force verticale atteint durant la montée du système de la crémaillère avec la prothèse comme effecteur final pour (A), l'orientation du pied en position d'attaque talon pour (B), l'orientation du pied en position à plat et pour (C), l'orientation du pied en position de décollement des orteils. 64

Figure 31 : Résultats des données de la valeur moyenne de la force verticale durant la phase où le sol reste fixe verticalement avec la prothèse comme effecteur final pour (A), l'orientation du pied en position d'attaque talon pour (B), l'orientation du pied en position à plat et pour (C), l'orientation du pied en position de décollement des orteils. 65

Figure 32 : Résultats des données pour (A), des données du pic de la force verticale atteint durant la montée du système de la crémaillère et pour (B), des données de la valeur moyenne de la force verticale durant la phase où le sol reste fixe verticalement avec la forme rigide comme effecteur final. 66

Figure 33 : Position des 6 marqueurs sur la jambe mécanique..... 70

Figure 34 : Trajectoire de pilotage du simulateur mécanique pour (A), le système de bielle/manivelle (en °) pour (B), l'inclinaison de la pièce intermédiaire par rapport à la direction verticale (en °) pour (C), le système à crémaillère (en mm) pour (D), le vérin pneumatique avec la pression (en bleu et en mbar) et l'état du distributeur (en orange et en TRUE/FALSE)..... 71

<i>Figure 35 : Système de scanner 3D du dispositif « Scan In a Box ».</i>	<i>74</i>
<i>Figure 36 : Simulation mécanique du test d'usure pour le test initial avec (A), l'instant d'attaque du pied avec le sol mobile suivit de (B), la phase du pied à plat puis de (C), la phase de propulsion et pour finir de (D), l'instant de décollage du pied avec le sol.</i>	<i>75</i>
<i>Figure 37 : Force de réaction verticale moyenne des testeurs humains pour (A), la marche à 3 km/h et pour (B), la marche à 5 km/h en comparaison avec les signaux de force du simulateur avec les 4 poids choisis.</i>	<i>78</i>
<i>Figure 38 : Force de réaction antéro-postérieure moyenne des testeurs humains pour (A), la marche à 3 km/h et pour (B), la marche à 5 km/h en comparaison avec les signaux de force du simulateur avec les 4 poids choisis.</i>	<i>79</i>
<i>Figure 39 : Courbes pour (A), des forces verticales et pour (B), des forces antéro-postérieures produites par le simulateur mécanique suivant les différents paliers du test d'usure.</i>	<i>82</i>
<i>Figure 40 : Etat de la semelle pour (A), le test initial puis pour (B), le test intermédiaire simulant 30 jours d'utilisation et pour (C), le test final simulant 60 jours d'utilisation avec en rouge l'évolution des zones d'abrasion se développent au niveau du talon et de l'avant pied de la semelle de la chaussure.</i>	<i>84</i>
<i>Figure 41 : Comparaison du niveau d'abrasion entre le scan de la chaussure lors du test initial et après le test final d'usure. Les différences sont exprimées en mm avec en rouge une différence maximale où la chaussure a perdu « de la matière » et en bleu une différence maximale où la chaussure a gagné « de la matière ».</i>	<i>84</i>
<i>Figure 42 : Forces de réaction pour (A), suivant l'axe vertical et pour (B), suivant l'axe antéro-postérieur issus des simulations mécaniques des travaux de Jones (2014) pour deux types de programmation basée sur les données de testeurs humains.</i>	<i>86</i>
<i>Figure 43 : Courbe d'exemple du déplacement et de la vitesse du chariot suivant les points de pilotage pour une vitesse machine de 30 tr/min.</i>	<i>92</i>
<i>Figure 44 : Schéma du simulateur mécanique de marche et de course pied (vue de face) avec la position des différentes amplitudes de déplacement.</i>	<i>93</i>
<i>Figure 45 : Exemple de choix de position de départ dans le cycle avec trois α_0 différents : pour (A), 0° pour (B), 45° et pour (C), 90°.</i>	<i>96</i>
<i>Figure 46 : Profils d'orientation de la pièce intermédiaire qui respecte la contrainte de vitesse relative pied/sol (équation (15)) pour différentes positions α_0 de la bielle au moment du contact pied/sol. Dans cet exemple, la solution retenue est le couple $\alpha_0 = 0^\circ$ et $\alpha = 34$ tr/min</i>	

<i>(vitesse de rotation obtenue par la méthode décrite au paragraphe 5.2.3.1.1. Choix de la vitesse machine (α)).....</i>	<i>97</i>
<i>Figure 47 : Courbes pour (A), des forces verticales et pour (B), des forces antéro-postérieures produites par le simulateur mécanique suivant les différentes hypothèses permettant de simuler mécanique de la marche à 3 km/h soit une vitesse machine de 34 tr/min.....</i>	<i>100</i>
<i>Figure 48 : Courbes pour (A), des forces verticales et pour (B), des forces antéro-postérieures produites par le simulateur mécanique suivant les différentes simulations mécaniques de vitesse de marche et de course à pied pour l'hypothèse 2 : rotation autour du point du talon de la chaussure suivie d'une rotation autour du point du bout du pied.</i>	<i>102</i>
<i>Figure 49 : Exemple de l'impact de la diminution de la vitesse de simulation mécanique (pour une activité de course à pied) sur la reproduction de la force de réaction verticale avec en bleu les données de la simulation mécanique et en rouge les données de référence d'un testeur humain pour (A), 100 % de la vitesse réelle et pour (B), 50 % de la vitesse réelle. Graphiques issus des travaux de Nguyen (2017).</i>	<i>106</i>
<i>Figure 50 : Forces de réaction antéro-postérieure pour (A), les travaux de Jones (2014) portant sur la simulation mécanique de la marche à 5 km/h (avec en noir la courbe de référence d'un testeur humain) pour (B), les travaux de Nguyen (2017) portant sur la simulation mécanique de la course à 12 km/h (avec en bleu la courbe de référence d'un testeur humain) et pour (C), les travaux de Ronkainen et al. (2010) portant sur la simulation mécanique de la course (avec en noir la courbe de référence d'un testeur humain) pour une attaque talon (figure de gauche) et une attaque avant-pied (figure de droite).....</i>	<i>107</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Résultats des tests physiques en fonction du nombre de jours d'utilisation de la chaussure Adidas Stan Smith. *Différence significative entre le test initial et le test intermédiaire. **Différence significative entre le test initial et le test final.</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 2 : Résultats dynamiques des tests biomécaniques de la marche à 3 km/h en fonction du nombre de jours d'utilisation de la chaussure Adidas Stan Smith.</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 3 : Résultats cinématiques des tests biomécaniques de la marche à 3 km/h en fonction du nombre de jours d'utilisation de la chaussure Adidas Stan Smith.</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 4 : Résultats dynamiques des tests biomécaniques de la marche à 5 km/h en fonction du nombre de jours d'utilisation de la chaussure Adidas Stan Smith. **Différence significative entre le test initial et le test final.....</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 5 : Résultats cinématiques des tests biomécaniques de la marche à 5 km/h en fonction du nombre de jours d'utilisation de la chaussure Adidas Stan Smith. *Différence significative entre le test initial et le test intermédiaire.....</i>	<i>20</i>
<i>Table 6 : Identified keywords and search strategies.</i>	<i>27</i>
<i>Table 7 : What type of controlled is used?</i>	<i>30</i>
<i>Table 8 : How is the foot-ankle complex represented?</i>	<i>31</i>
<i>Table 9 : What are the results in terms of biofidelity and shoe wear?</i>	<i>32</i>
<i>Table 10 : Patent Appendix with number, title and year for each patent.....</i>	<i>38</i>
<i>Table 11 : Existing test machines appendix with the name of the company, its location, the name of the machine or test in question and the web link.</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 12 : Coefficients des modèles linéaires pour la donnée du pic de la force verticale atteint durant la montée du système de la crémaillère avec $p < 0.001^{***}$, $p < 0.01^{**}$ et $p < 0.05^*$.....</i>	<i>67</i>
<i>Tableau 13 : Coefficients des modèles linéaires pour la donnée de la valeur moyenne de la force verticale durant la phase où le sol reste fixe verticalement avec $p < 0.001^{***}$, $p < 0.01^{**}$ et $p < 0.05^*$.....</i>	<i>67</i>

<i>Tableau 14 : Résultats de la comparaison des variables temporelles et cinématiques entre la machine et les testeurs humains (vitesse de marche à 3 et 5 km/h) pour le test initial de la chaussure Adidas Stan Smith.</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 15 : Résultats de la comparaison des variables dynamiques entre la machine et les testeurs humains (vitesse de marche à 3 et 5 km/h) pour le test initial de la chaussure Adidas Stan Smith.</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 16 : Tableau des résultats du rapport entre le coefficient de variation du simulateur et le coefficient de variation des testeurs humains à 3 et 5 km/h (en %) pour les variables temporelles et cinématiques avec en vert, les résultats où le simulateur est plus répétable que les testeurs humains et en rouge les résultats où le simulateur est moins répétable que les testeurs humains.</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 17 : Tableau des résultats du rapport entre le coefficient de variation du simulateur et le coefficient de variation des testeurs humains à 3 et 5 km/h (en %) pour les variables dynamiques avec en vert, les résultats où le simulateur est plus répétable que les testeurs humains et en rouge les résultats où le simulateur est moins répétable que les testeurs humains.</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 18 : Tableau des résultats de la simulation mécanique pour les variables dynamiques. *Différence significative entre le test initial et le test intermédiaire. **Différence significative entre le test initial et le test final. ***Différence significative entre le test intermédiaire et le test final.</i>	<i>82</i>
<i>Tableau 19 : Tableau des résultats de la simulation mécanique pour les variables temporelles et cinématiques. *Différence significative entre le test initial et le test intermédiaire. **Différence significative entre le test initial et le test final. ***Différence significative entre le test intermédiaire et le test final.</i>	<i>83</i>
<i>Tableau 20 : Exemple d'une partie de l'abaque machine du choix de l'utilisation des vitesses machine pour les simulations mécaniques en fonction du nombre de points de pilotage choisis. En vert, les combinaisons réalisables et en rouge les combinaisons non réalisables par le simulateur mécanique de marche et de course à pied.</i>	<i>95</i>
<i>Tableau 21 : Information sur la différence du temps de contact cible (celui des testeurs humains réalisant un essai de course à pied) et le temps de contact simulé (celui obtenu lors de la simulation mécanique) pour les études scientifiques présentées dans la « scoping review » s'intéressant à l'activité de marche et de course à pied.</i>	<i>104</i>

Chapitre 1 : Introduction

1.1. Objectifs de la thèse et questions de recherche

Les industriels du monde de la chaussure (aussi bien pour le sport que pour la vie quotidienne) cherchent à tester leurs produits dans des conditions réelles d'utilisation afin de déterminer leur performance (durabilité, amorti, stabilité, etc.), leur confort et leur sécurité. La notion de durabilité des produits et donc la résistance à l'usure est de plus en plus présente au sein de cette industrie avec notamment des créations de label écologique (Commission Decision (EU) 2016/1349). Cependant, il n'existe actuellement pas de référentiel (national ou international) définissant les critères de durabilité pour les chaussures.

Pour simuler l'usure des chaussures, les industriels disposent de trois approches différentes qui sont étudiées dans la littérature scientifique :

- ✘ Les tests « au porté » sur testeurs humains.
- ✘ Les tests physiques sur des bancs de tests mécaniques ([Figure 1](#)).
- ✘ Les tests virtuels réalisés sur ordinateur.

L'approche des tests « au porté » ou tests d'usure (c'est-à-dire les tests effectués sur des testeurs humains dans des conditions écologiques) est la plus réaliste pour caractériser la résistance à l'usure des chaussures. Néanmoins, de tels tests sont inopportuns pour un certain nombre de raisons qui sont : la durée des expériences, la variabilité des résultats (Bates et al., 1983) et le faible nombre de sujets et de tests par participant qui peut poser problème en terme de représentativité (Odenwald, 2006). Les résultats de cette approche peuvent être fortement influencés par des facteurs tels que le poids du sujet, la façon de marcher ou de courir, le niveau d'activité, la surface du sol ou encore les conditions environnementales difficiles à mesurer et à contrôler. Les tests « au porté » peuvent être une réponse pertinente, mais nécessitent un investissement humain et financier important associé à un temps d'étude relativement long. Ces tests restent délicats à mettre en œuvre (cf. Chapitre 2 : Expérimentation d'usure « au porté ») et le plus souvent des tests physiques sont effectués à la place.

Les tests physiques sont des tests unitaires, de laboratoire, visant à évaluer spécifiquement une caractéristique de la chaussure ([Figure 1](#)), telle que la résistance : à la déchirure (ISO 17696), à la flexion répétée des semelles (ISO 177007) ou mesurer : la

souplesse longitudinale en flexion (méthode CTC), le coefficient de transfert du semelage (méthode CTC), etc. L'approche des tests physiques est rapide, facile à utiliser, simple à régler et contrôler. De plus, les valeurs sont reproductibles mais elles sont parfois éloignées de la réalité. En effet, les tests physiques ne prennent pas en compte la chaussure dans son ensemble, mais une seule de ses caractéristiques. Un test correspond à la mesure d'une seule variable de la chaussure. Ainsi, les tests physiques permettent de classer les matériaux composant les différentes chaussures et ayant des capacités mécaniques spécifiques plutôt que de caractériser directement les performances réelles de ces dernières.



Figure 1 : Exemple de tests physiques recommandés en chaussure.

L'approche des tests virtuels (Mara, 2007) offre des possibilités d'évaluation infinies en utilisant uniquement un logiciel de calcul numérique de type éléments finis. Néanmoins, les modèles restent difficiles à utiliser à cause de la complexité de la

géométrie des composants de la chaussure et du pied, de la gestion des interfaces pied-chaussure et des lois de comportements des matériaux.

Une approche alternative aux tests « au porté » et aux tests physiques consiste à réaliser l'usure sur une machine simulant l'ensemble de la phase de contact du pied avec le sol afin de produire des interactions entre la chaussure et le sol les plus réalistes possibles (Figure 2). Bien qu'intéressante, la mise en œuvre de cette approche reste encore insatisfaisante puisqu'il n'existe actuellement pas de méthode (ou de machine) permettant de simuler l'usure mécanique des chaussures qui soit à la fois proche de la réalité et avec un temps de test réduit et des moyens financiers et humains limités (cf. 3.1.2. Scoping review (Shoe wear test machine: what exists vs. innovations and promising concepts)).

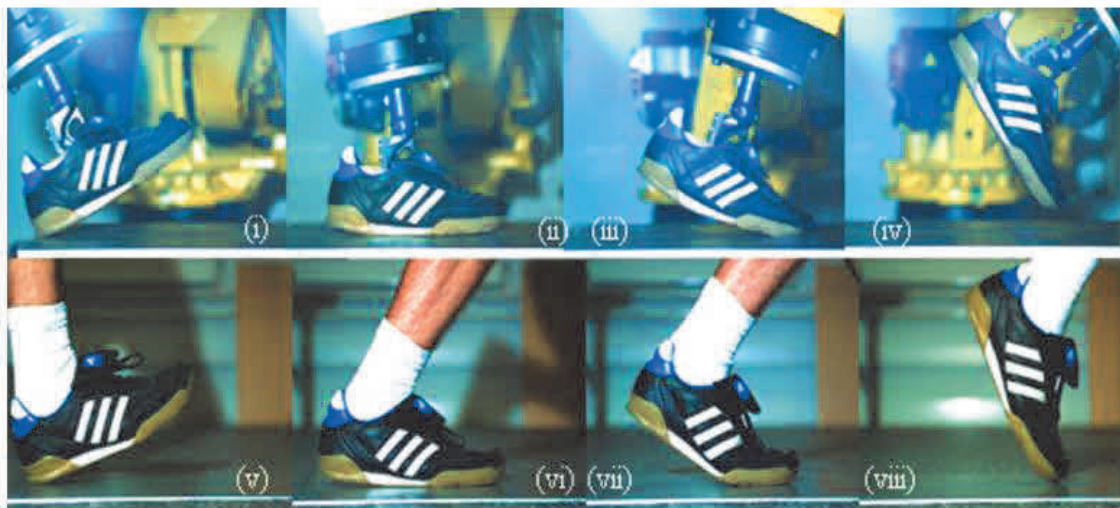


Figure 2: Exemple des travaux de Ronkainen et al. (2010), illustrant la simulation mécanique, de l'ensemble de la phase contact du pied avec le sol, réalisée par une machine (partie supérieure) comparée à un testeur humain (partie inférieure) réalisant de la course à pied avec une attaque talon.

Cette thèse vise à développer une méthode expérimentale d'usure de chaussures par le biais de la mise au point d'une machine de test des produits chaussants reproduisant au mieux les interactions chaussure/sol au cours de la phase d'appuis. Les chapitres suivants permettent d'atteindre l'objectif ci-dessus et abordent les problématiques et questions de recherche suivantes :

1. Que signifie une usure "réaliste" de chaussure et comment l'obtenir ?
 - ✘ Évaluer l'usure des chaussures au cours de l'usage.
 - ✘ Évaluer la faisabilité d'une expérimentation « au porté ».

- ✘ Créer une base de données de variables biomécaniques décrivant l'interaction pied/sol pour différents types de marche.
 - ✘ Recenser l'existant en termes de machine et méthodes de test par l'étude de la littérature scientifique, de la littérature grise (brevet, etc.) et l'analyse des solutions proposées sur les sites web.
2. Comment piloter une machine de test, dont les caractéristiques sont éloignées de l'anatomie humaine en termes de degrés de liberté et d'actionneurs, afin de reproduire des interactions chaussure/sol bio-fidèles ?
- ✘ Mettre au point, ajuster et caractériser une machine de test.
 - ✘ Mettre au point une stratégie de contrôle du pilotage de la machine permettant de gérer les interactions entre un pied compliant et le sol.
3. Est-il possible de réaliser un test d'usure complet sur un simulateur mécanique (i.e. simulation de plus de 150 000 cycles de marche) ?
- ✘ Démontrer la faisabilité d'un test d'usure sur une machine.
 - ✘ Évaluer les caractéristiques de la simulation elle-même (durée de l'essai, fiabilité de la machine) et de ses résultats (usure de la semelle).

1.2. Structure de la thèse

La [Figure 3](#) montre comment les chapitres de ce manuscrit permettent de répondre aux différentes questions de recherche. La première question de recherche sur l'usure « réaliste » est abordée dans le Chapitre 2 : Expérimentation d'usure « au porté » et la manière de l'obtenir est abordée dans le Chapitre 3 : Partie 3.1. Revue de littérature sur les simulateurs existants, qui présente une revue de littérature sous forme d'articles en anglais sur les concepts de simulateur mécanique pertinents. Les informations (mécaniques, biomécaniques et d'usure) recueillies en répondant à cette première question de recherche sont utilisées pour répondre à la deuxième question de recherche (pilotage de la machine) qui est à la fois traitée dans le Chapitre 3 : Partie 3.2. Simulateur mécanique de CTC qui aborde la mécanique et le pilotage du simulateur mécanique développé au cours de cette thèse mais également dans le Chapitre 5 : Génération de trajectoires de pilotage du simulateur mécanique, qui porte sur les différentes possibilités de génération des trajectoires de pilotage de cette machine. Pour finir les données (de pilotage et d'usure) recueillies en répondant aux questions de recherche 1 et 2 servent de base pour répondre à la troisième question de recherche (test d'usure sur simulateur mécanique) qui est étudiée dans le Chapitre 4 : Tests de simulation mécanique d'usure pour une activité de marche, dans lequel le premier test d'usure de chaussure de longue durée pour une activité de marche est réalisé.

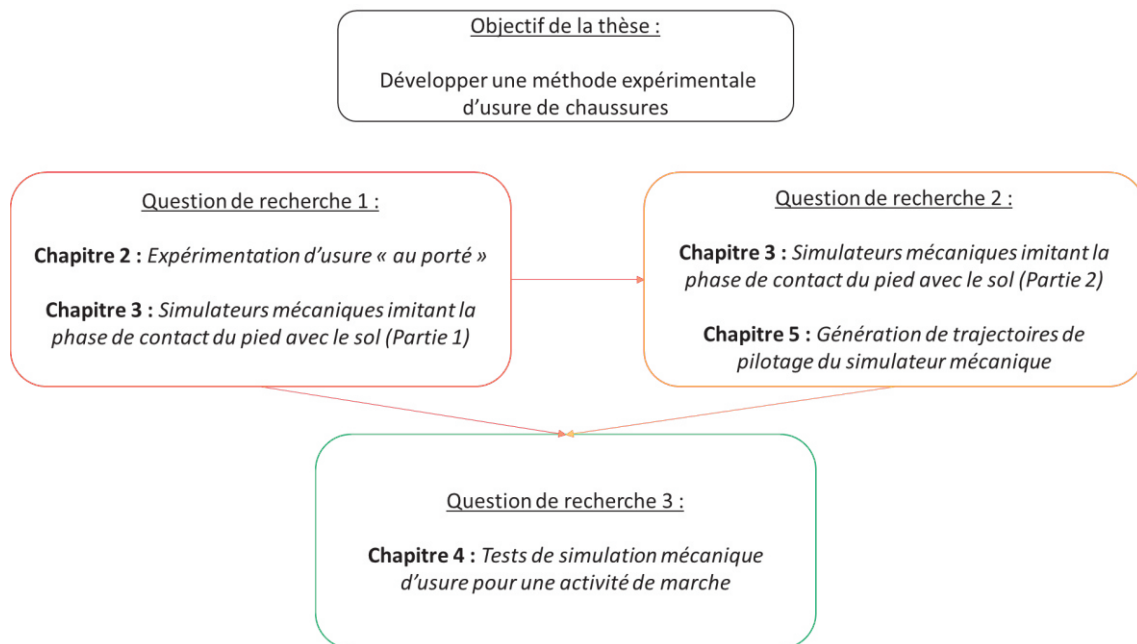


Figure 3 : Schéma de l'interaction entre les chapitres de la thèse et leur lien avec chaque question de recherche individuelle.

Chapitre 2 : Expérimentation d'usure « au porté »

2.1. Introduction

2.1.1. Contexte

L'un des objectifs de cette thèse est d'étudier la possibilité d'utiliser des chaussures à l'aide d'un simulateur mécanique reproduisant le plus fidèlement possible les conditions réelles d'utilisations, pour des activités de marche voire de course à pied. Pour cela, nous avons besoin de données expérimentales concernant la phase de contact du pied avec le sol (données cinématiques et dynamiques) ainsi que les caractéristiques mécaniques et d'usure de la chaussure. Nous sommes notamment intéressés par l'évolution de ces caractéristiques au cours de la vie de la chaussure. Ces données nous seront utiles pour pouvoir programmer la machine (cf. Chapitre 3 : Simulateurs mécaniques imitant la phase de contact du pied avec le sol) mais également de pouvoir valider les résultats des diverses simulations d'usure mécaniques (cf. Chapitre 4 : Tests de simulation mécanique d'usure pour une activité de marche).

Pour tenter de simuler l'usure au niveau d'une chaussure, nous avons d'abord besoin d'étudier la manière dont les propriétés mécaniques des chaussures se dégradent au cours de leur usage et notamment au niveau de la semelle. En effet, l'usure en chaussures est un thème de plus en plus abordé par les industriels (notamment grâce au développement durable et à la notion de durabilité des produits), mais au-delà du côté commercial, on peut se demander s'il existe de manière scientifique un seuil (nombre de pas/cycles ou de kilomètres effectués) permettant de dire que les propriétés mécaniques des chaussures ont évolué de manière significative par rapport à l'état neuf. Tout d'abord, dans la littérature scientifique, il existe deux méthodes d'usure des chaussures :

- ✘ Une usure réalisée à l'aide de machines spécifiques comme un banc d'essai mécanique de fatigue (MTS Systems Corp, Minneapolis, MN). Dans ce cas, le nombre de cycles réalisé est l'unité utilisée pour tenter de déterminer les stades d'usure des chaussures et ainsi une correspondance en nombre de kilomètres peut être effectuée à l'aide de la fréquence (Verdejo & Mills, 2004) ou du nombre de cycles (Cook et al., 1985).
- ✘ Une usure réalisée à l'aide de testeurs humains. Dans ce cas, soit le nombre de kilomètres (ou miles) (Heidenfelder et al., 2009; Kong et al., 2009) parcourus ou le temps entre les tests (généralement en mois) (Herbaut et al., 2017;

Jafarnezhadgero et al., 2021) sont les unités utilisées pour tenter de déterminer les stades d'usure des chaussures.

Quelle que soit la méthode d'usure utilisée, pour une activité de course à pied, il semble que, de manière unanime, la raideur (Chambon et al., 2014; Cook et al., 1985; Jafarnezhadgero et al., 2021) et la dureté (Cornwall & McPoil, 2017) des chaussures augmentent tandis que la capacité d'absorption des chocs (Cook et al., 1985; Herbaut et al., 2017) et l'épaisseur des semelles (Lippa et al., 2019) des chaussures diminuent. D'après Cook et al. (1985), la capacité d'absorption des chocs diminue de manière exponentielle au cours de l'usure que subit la chaussure par le banc d'essai mécanique entre 0 et 400 km puis se stabilise entre 400 et 800 km. Cependant, pour Lippa et al. (2019), la diminution de cette variable se fait directement après les 5 premiers kilomètres et n'évolue plus au cours de l'usure. Pour la raideur, il semble que la diminution évolue de manière linéaire au cours de l'usure (Chambon et al., 2014) tandis que la dureté augmente rapidement entre 0 et 160 km puis stagne entre 160 et 640 km (Cornwall & McPoil, 2017). À la vue des résultats des études présentées, il ne semble pas clairement apparaître de palier clef dans la modification des propriétés mécaniques et il est impossible de statuer sur un seuil précis à partir duquel les propriétés mécaniques ont réellement évolué. Cela peut être dû à la manière dont l'usure est réalisée. Cook et al. (1985) ont montré que le pourcentage d'énergie absorbée par une chaussure après une usure de 800 km était différent entre les deux méthodes (70 % de l'absorption des chocs sont conservées après 800 km pour l'usure réalisée avec des testeurs humains contre seulement 60 % pour l'usure réalisée avec machine). On note également un manque d'étude réalisant des stades intermédiaires entre le test initial et le test final d'usure (Herbaut et al., 2017; Jafarnezhadgero et al., 2021). Enfin, on peut constater l'absence de telles données concernant une activité de marche.

Dans la démarche d'utilisation d'un simulateur mécanique d'usure de chaussure, nous pouvons également nous demander si les modifications mécaniques des chaussures dues à l'usure impactent la façon dont les testeurs humains se déplacent. En effet, cette interrogation peut directement impacter la manière de concevoir le pilotage du simulateur mécanique au cours du temps. Faut-il faire évoluer la trajectoire de simulation de marche ou de course à pied au cours du temps en modifiant certains aspects comme l'angle d'attaque du pied par rapport au sol? On constate effectivement que des modifications au niveau de la dynamique et de la cinématique de course apparaissent. Certaines études montrent notamment une augmentation du taux de charge de la force verticale durant la phase de freinage du contact au sol (Heidenfelder et al., 2009; Herbaut et al., 2017; Lippa et al., 2019) avec l'usure des chaussures (respectivement après 42 km, 4 mois d'utilisation et 600 km). On note que Kong et al. (2009), n'observent aucune modification de cette variable entre le test initial et le test après 320 km de course à pied. Ces auteurs expliquent cela par le fait que les coureurs modifient leurs cinématiques pour maintenir des charges externes constantes. En effet, les angulations au niveau du genou et de la cheville sont différentes au cours de la phase d'appui mais pas à l'instant où le pied touche le sol entre une chaussure neuve et une chaussure usée. Cette modification

d'angulation semble cependant arriver plus tardivement durant la phase d'appui pour Herbaut et al. (2017) en comparaison à Kong et al. (2009). Cela est peut-être dû à la différence de population étudiée entre les deux études : enfant contre adulte respectivement. Néanmoins, il semble que quelle que soit la population analysée, personne n'est capable d'ajuster la cinématique des articulations de la cheville et du genou avant l'impact. Il en est de même pour l'angle formé entre la chaussure et le sol au moment de l'impact du pied avec le sol (Herbaut et al., 2017).

L'usure en chaussures a été bien étudiée pour l'activité de course à pied, malgré les questions restantes en suspens, mais qu'en est-il de l'activité de marche et notamment l'usure des chaussures au quotidien ? Il n'existe que peu d'études comparant les effets du nombre de pas ou de kilomètres effectués sur les propriétés mécaniques des chaussures et sur la dynamique et cinématique des membres inférieurs pendant une activité de marche. Seul Jafarnezhadgero et al. (2020) observent des modifications mécaniques des propriétés des chaussures au cours d'un vieillissement de 6 mois des chaussures à l'aide de testeurs humains mais sans réaliser de paliers intermédiaires. Ils observent une augmentation de la raideur des chaussures avec l'usure comme pour les chaussures utilisées pour la course à pied. Cependant, contrairement à la course à pied, le taux de charge de la force verticale diminue avec l'usure ainsi que les pics d'effort sur la force verticale alors que le temps pour arriver au premier pic d'impact vertical augmente. La cinématique du membre inférieur n'étant pas mesurée, il n'est pas possible d'attribuer ces modifications à des ajustements cinématiques dus à l'usure des chaussures afin de protéger le corps humain. Il manque des études sur la marche afin de confirmer ces premiers résultats, qui sont en désaccord avec ceux de la course. Il serait aussi nécessaire de réaliser une étude longitudinale sur l'évolution des propriétés mécaniques et les répercussions sur l'humain tout au long de la vie des chaussures de marche.

Parmi toutes ces études, une donnée importante est parfois mentionnée : le temps de test (ou « temps d'usure »). En effet, l'un des avantages d'un simulateur mécanique permettant d'user de manière globale une chaussure (tige comme semelle) est le temps d'usure. Quand on regarde le temps mis pour user mécaniquement uniquement une zone de la semelle de la chaussure (talon ou avant pied), on se rend rapidement compte que cette méthode est bien plus rapide que l'usure réalisée par des testeurs humains qui eux usent l'ensemble de la chaussure. On note pour une usure mécanique un temps de 4,8 heures pour une correspondance de 42 km (Lippa et al., 2019) et de 52 heures pour une correspondance de 660 km (Chambon et al., 2014) quand pour une usure avec des testeurs humains cela prend 16 semaines pour 320 km (Kong et al., 2009), voire 24 semaines pour 400 km (Jafarnezhadgero et al., 2021) ou encore 32 semaines pour 660 km (Cornwall & McPoil, 2017). En plus du temps considérable d'usure des chaussures nécessaire pour les études avec des testeurs, il y a un risque que ces derniers n'atteignent pas le kilométrage final visé. En effet, pour Kong et al. (2009), 6 sujets sur 30 (soit 20 %) n'ont pas terminé l'étude pour diverses raisons : blessure ou abandon sans motif indiqué. Ces tests d'usure sont majoritairement utilisés par les industriels durant la phase de prototypage, qui par la suite permet de lancer la phase de production de masse avant la

vente sur le marché. Il est par conséquent primordial de maîtriser les temps de tests, de les réduire au maximum et d'être sûr d'obtenir les paliers d'usure souhaités afin de ne pas retarder la production.

Par conséquent, nous avons mené une expérimentation d'usure « au porté » dont le but était de quantifier les conséquences du vieillissement d'une chaussure de ville (du type « sneakers ») sur ses propriétés mécaniques et sur la biomécanique de la marche.

2.1.2. Objectifs

Plusieurs objectifs sont mis en avant durant cette expérimentation :

- ✘ Connaître le nombre de cycles (nombre de pas) permettant d'observer une évolution des propriétés mécaniques des chaussures.
- ✘ Collecter et analyser les données de référence cinématiques et dynamiques (interaction pied/sol).
- ✘ Déterminer l'impact de l'évolution des propriétés mécaniques des chaussures sur la cinématique du membre inférieure et les efforts d'interaction pied/sol.
- ✘ Évaluer les contraintes d'une expérimentation « au porté » contrôlée afin de quantifier les potentiels bénéfiques d'une simulation mécanique.

2.2. Méthode

Le principe de cette expérimentation était de fournir aux participants une paire de chaussures neuves, équipée d'un podomètre, que les participants devaient utiliser au quotidien sur leur lieu de travail. Lorsqu'un participant atteignait un des paliers d'usure (tous les 30 jours), il était invité à effectuer une session d'analyse de la marche au laboratoire d'analyse du mouvement et les caractéristiques mécaniques des chaussures étaient évaluées au laboratoire physique.

2.2.1. Sujets

Six sujets masculins en bonne santé (âge = 36.8 ± 7.8 ans, taille = 1.78 ± 0.03 m, masse corporelle = 74.9 ± 6.1 kg) ont été recrutés pour l'étude. Les critères d'exclusion étaient les suivants : des blessures aux membres inférieurs dans les 12 derniers mois et l'utilisation d'appareils orthopédiques. Les participants ont donné leur consentement éclairé par écrit suite à une description de l'expérimentation.

2.2.2. Équipement

2.2.2.1. Chaussure

Au cours de cette expérimentation les participants étaient amenés à porter un seul modèle de chaussures. Ce modèle était une paire de chaussures de ville du type « sneakers », à savoir les chaussures Adidas Stan Smith.

2.2.2.2. Podomètre

Afin de comptabiliser le nombre de pas réalisés par les testeurs entre chaque session d'analyse en laboratoire, les chaussures de nos testeurs étaient équipées d'un podomètre (ONWALK 900, Newfeel, Décathlon, France). Ce podomètre était fixé sur les lacets de la chaussure à l'aide d'un clip ([Figure 4](#)).



Figure 4 : Podomètre fixé sur la chaussure Adidas Stan Smith.

2.2.2.3. Dispositifs d'enregistrement de la cinématique et de la dynamique

Pour la partie dynamique, nous avons utilisé un tapis instrumenté de deux plateformes de force de la marque Bertec (Fully Instrumented Treadmill, Bertec, Columbus, OH, USA) avec une fréquence d'acquisition fixée à 2000 Hz. Ce tapis instrumenté permet notamment de conserver une vitesse de marche toujours stable et de recueillir les données de force et moment de réaction du sol dans les 3 axes sous chaque pied.

Pour la partie cinématique, nous avons utilisé un ensemble de sept caméras (Kestrel 2200, Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, CA, USA) de la marque Motion Analysis (CA, USA) avec une fréquence d'acquisition de 200 Hz. Les participants étaient équipés de 22 marqueurs réfléchissants dont 14 sur le bassin et le membre inférieur droit du participant ([Figure 5](#)) et 8 sur la chaussure droite ([Figure 6](#)).

L'enregistrement des forces et moments de réaction du sol et des trajectoires de marqueurs réfléchissants était synchronisé à l'aide du logiciel Cortex (Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, CA, USA).

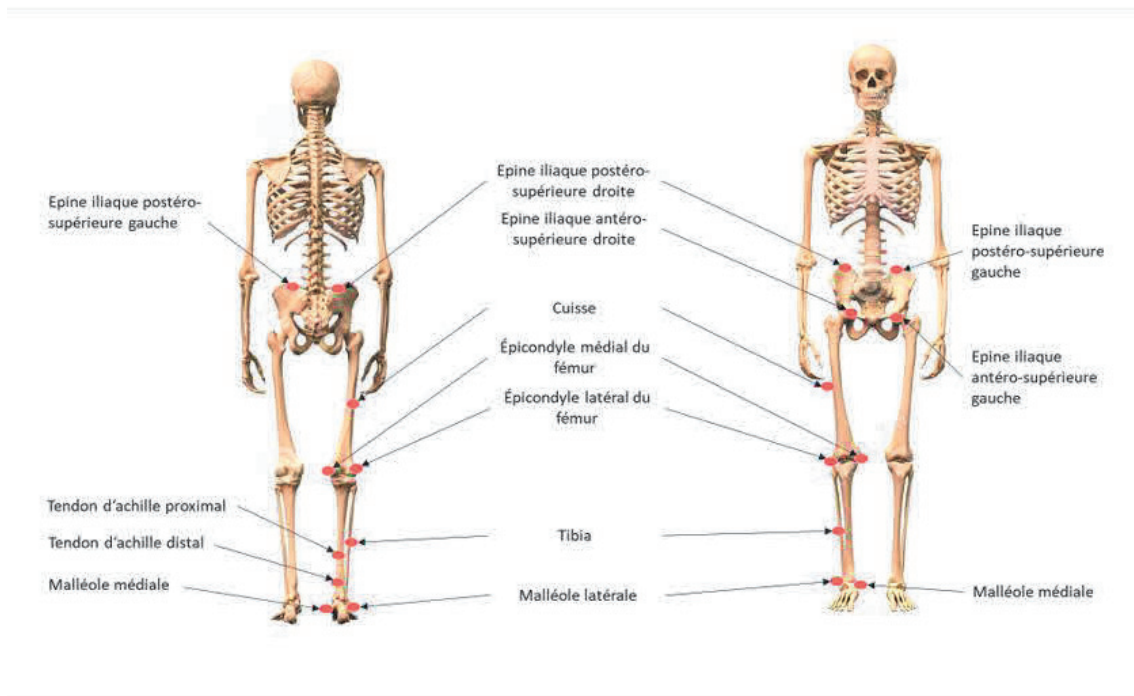


Figure 5: Position des 16 marqueurs sur le corps du participant utilisés lors de l'expérimentation.

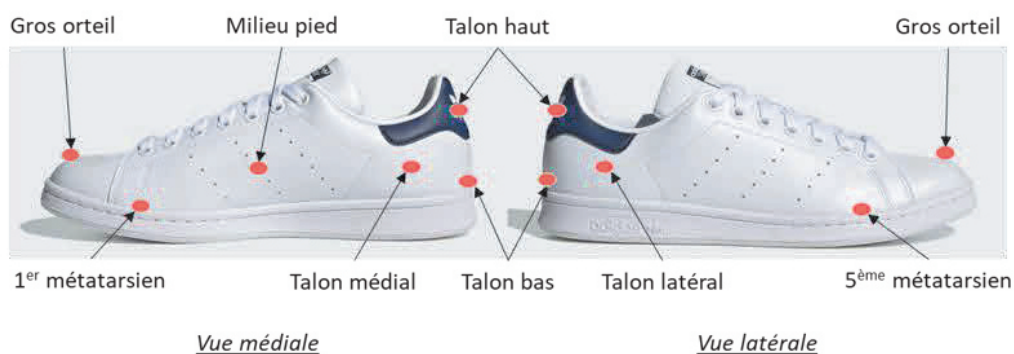


Figure 6: Position des 8 marqueurs sur la chaussure du participant utilisés lors de l'expérimentation.

2.2.2.4. Dispositifs de mesure des propriétés mécaniques de la chaussure

Des tests en laboratoire physique ont été réalisés afin de quantifier :

- ✘ La souplesse longitudinale (Méthode CTC P-CH-008) : ce test quantifie la force nécessaire pour faire plier la chaussure à 45° (Figure 7. A).

- ✘ Le coefficient de transfert du talon (Méthode CTC P-CH-002) : ce test quantifie la différence entre le pic d'impact appliqué au niveau extérieur du talon de la chaussure et sa résultante en sortie au niveau du pied du porteur (Figure 7. B).

Ces tests permettent de suivre la dégradation de ces deux propriétés mécaniques de la chaussure au cours de l'usure créée par le port de la chaussure par nos différents participants.

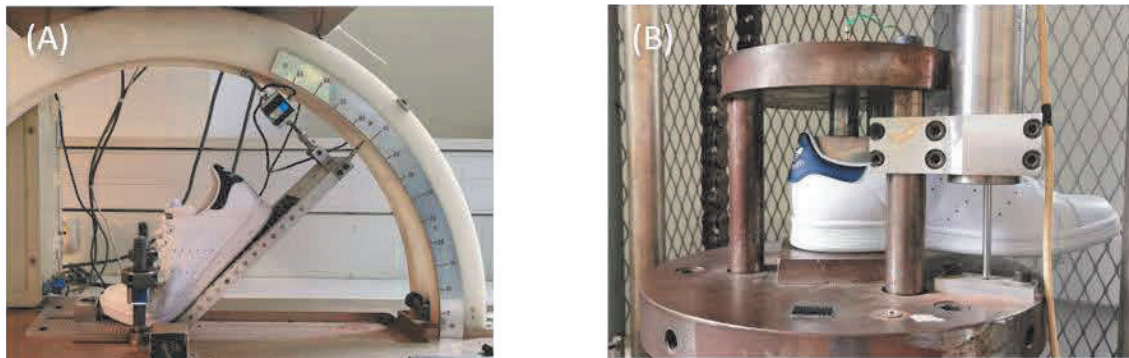


Figure 7 : A gauche (A), test de flexibilité longitudinale en flexion et à droite (B), test de coefficient de transfert.

2.2.3. Procédure

Lors de cette étude, les sujets réalisent un protocole en trois temps, avec trois visites au laboratoire d'analyse du mouvement entrecoupées de deux phases d'utilisation de la chaussure. Les visites au laboratoire permettent de caractériser la chaussure au cours de son utilisation : à l'état neuf, après 30 jours d'utilisation et après 60 jours d'utilisation.

Pour chaque visite au laboratoire, le participant réalise une analyse biomécanique de la marche sur un tapis roulant avec les marqueurs réfléchissants placés sur le corps et la chaussure. Le participant effectue d'abord un échauffement en marchant durant 5 minutes avec les chaussures afin de se familiariser au tapis roulant. Une fois que cette tâche est effectuée naturellement, le participant marche ensuite pendant 3 minutes sur le tapis instrumenté à deux bandes en faisant attention à poser à chaque fois un pied sur une bande différente du tapis pour les deux vitesses imposées (3 ou 5 km/h). Les vitesses sont randomisées entre elles. Les deux premières minutes permettent au participant de s'habituer au tapis et à la vitesse imposée. Les données sont collectées durant la troisième minute de l'essai. Une fois ces deux acquisitions réalisées, les chaussures du participant sont amenées au laboratoire physique pour être testées sur les deux tests de souplesse longitudinale et de coefficient de transfert du talon.

Entre les trois visites au laboratoire, les participants réalisent deux phases d'usure de la chaussure. Lors de ces phases d'usure, il est demandé aux participants d'utiliser la paire

de chaussure durant leurs jours de travail en entreprise. Cela permet que l'utilisation (durée d'utilisation quotidienne et nature des sols sur lesquels les chaussures sont en contact) soit comparable entre chaque participant. Pendant ces phases, le participant est amené à remplir un fichier de suivi avec le nombre de pas réalisé par jour. Les deux phases d'usure comprennent chacune 30 jours d'utilisation qui ne sont pas forcément consécutifs. En effet, comme le participant utilise ces chaussures uniquement durant les jours de travail, le temps minimum de ces phases est de 6 semaines mais il peut être allongé si le participant est en télétravail ou en congé.

2.2.4. Analyse

2.2.4.1. Traitement des données dynamiques

Le but de ce traitement était d'obtenir, comme dans les expérimentations antérieures (Jones, 2014; Nguyen, 2017; Ronkainen et al., 2010), des indices de quantification de l'impact au sol et de la phase d'appui avant le décollage du pied par rapport au sol. Pour ce faire, les signaux de force ont été filtrés par un filtre Butterworth d'ordre 4 avec une fréquence de coupure à 30 Hz.

Les phases de contact ont été identifiées comme les instants où la composante verticale des forces de réaction dépasse un seuil fixé à 20 newtons. Ceci a permis d'obtenir les temps de contact pour chaque pas.

Différents indices caractérisant le contact pied-sol ont été calculés sur les composantes verticale et antéro-postérieure des forces de réaction au sol.

L'impact a été notamment caractérisé sur la composante verticale ([Figure 8](#)) via les indicateurs suivants :

- ❖ Le pic dit « passif » (N) qui correspond au premier pic sur le signal de force verticale.
- ❖ Le temps de montée en force (s), qui correspond au temps nécessaire pour arriver au pic passif.
- ❖ Le taux de charge (N/s), qui a été calculé par la pente entre 20 et 80% du temps de montée en force.

Le début de la phase de contact (phase de freinage) a également été caractérisé à partir du signal de force antéro-postérieure ([Figure 9](#)) par les indicateurs suivants :

- ❖ Le pic de freinage (N), qui correspond à la valeur du premier pic de force sur le signal de force antéro-postérieure.
- ❖ Le temps de freinage (s) correspond au temps pour arriver au pic de freinage.

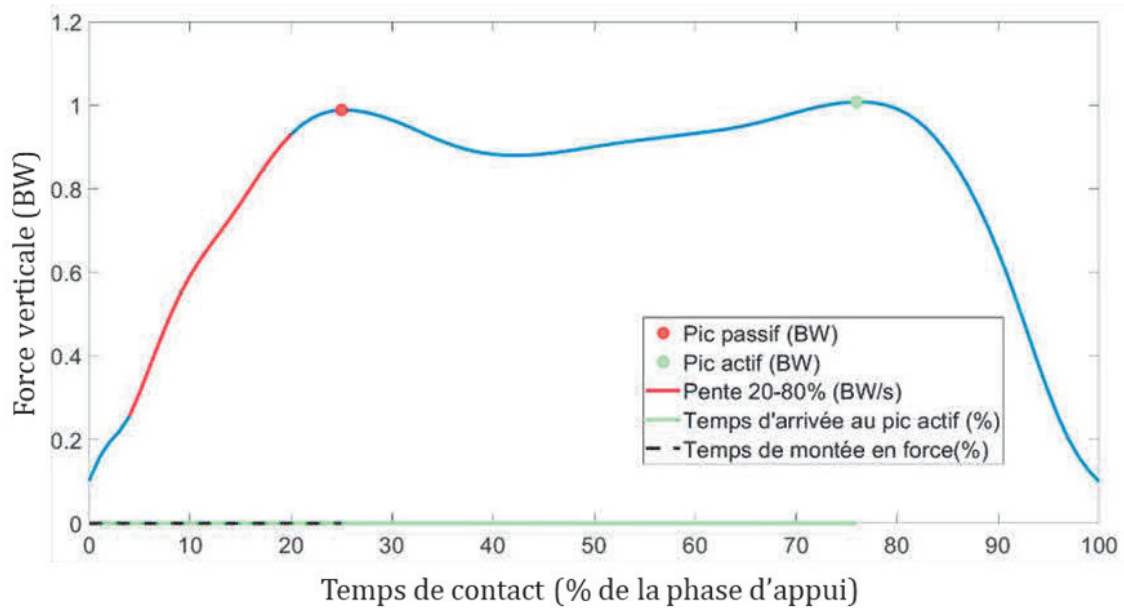


Figure 8 : Schéma de l'évolution de la force verticale à 3 km/h montrant les variables relevées.

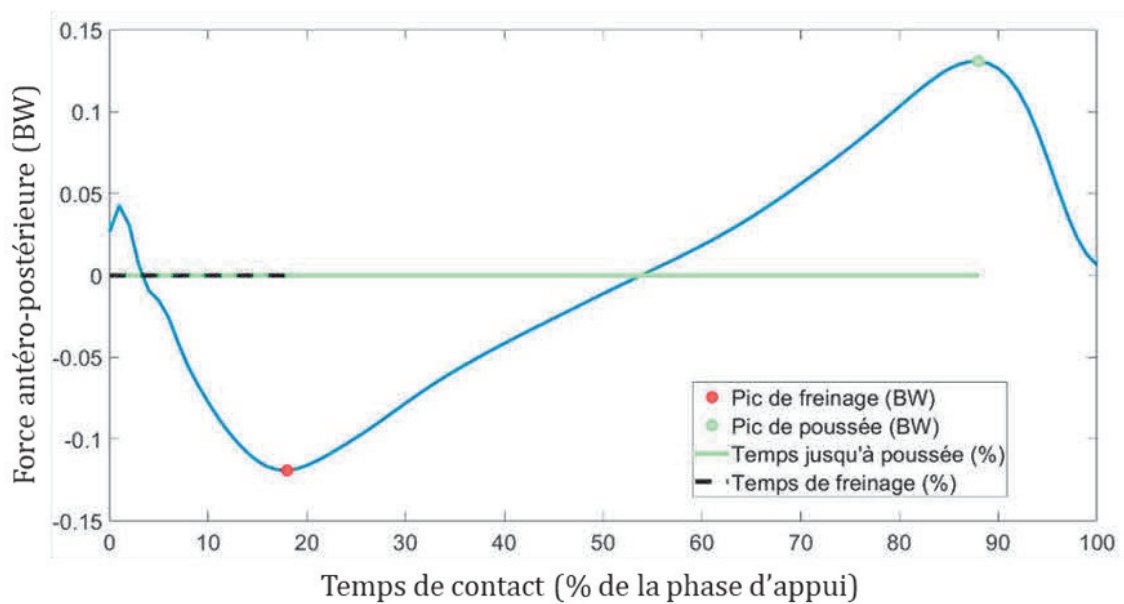


Figure 9 : Schéma de l'évolution de la force antéro-postérieure à 3 km/h montrant les variables relevées.

Ensuite nous avons caractérisé la phase propulsive du pas en quantifiant le pic dit « actif » et le pic de poussée dans les signaux de force verticale et antéro-postérieure (Figure 8 & Figure 9) :

- ✧ Le pic actif (N) a été obtenu en relevant la valeur du second pic sur le signal de force verticale.

- ✘ Le temps de d'arrivée au pic actif (s) correspond au temps nécessaire pour arriver au second pic de force verticale.
- ✘ Le pic de poussée (N) correspond à la valeur du second pic de force sur le signal de force antéro-postérieure.
- ✘ Le temps d'arrivée à la poussée (s) correspond au temps pour arriver au pic de poussée.

Chaque valeur de force a ensuite été normalisée par le poids de corps de chaque participant et chaque instant normalisé par la durée du temps de contact. Ceci permettant de comparer les valeurs entre les sujets, entre les tests et avec le simulateur ultérieurement.

2.2.4.2. Traitement des données cinématiques

La première étape du traitement est la labellisation des marqueurs sur le logiciel Cortex (Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, CA, USA). Elle consiste en une identification de chaque marqueur enregistré par les caméras.

Les trajectoires en trois dimensions des marqueurs ainsi obtenues ont ensuite été filtrées dans le logiciel Cortex à l'aide d'un filtre Butterworth passe-bas d'ordre 4 et de fréquence de coupure à 30 Hz.

Ces données ont ensuite été exportées sous forme de fichiers .C3D et traitées à l'aide du logiciel Matlab (MATLAB ver. R2015a, Natick, MA, USA). Des variables d'intérêts quantifiant prioritairement l'impact ont alors pu être estimées. Ces variables ont été retenues car elles paraissent essentielles pour le bon déroulement de la suite du pas (Lewis, 2005) :

- ✘ L'angle d'attaque ($^{\circ}$) dans le plan sagittal à chaque impact a été calculé en utilisant la position du marqueur postérieur du calcaneum et une position moyenne entre le marqueur du premier et cinquième métatarse décrit sur la [Figure 10](#). A cet angle a été retiré l'angle mesuré en position statique pour garantir un angle nul lorsque la semelle est à plat sur le sol.
- ✘ La vitesse en antéro-postérieure (V_{Ix}) et verticale (V_{Iz}) du marqueur postérieur du calcaneum au moment de l'impact. Cette vitesse est calculée à l'aide de la dérivée de la position du marqueur par rapport au temps.



Figure 10 : Méthode pour calculer l'angle d'attaque du pied au sol, le point rouge représentant le point moyen situé entre le marqueur du 1^{er} et le 5^{ème} métatarsien.

2.2.4.3. Traitement statistique

Pour toutes les variables dépendantes biomécaniques décrites ci-dessus, les valeurs moyennes sur 30 pas dans chaque condition ont été calculées pour chaque participant puis ont été moyennées entre les 6 participants. Pour les variables dépendantes des deux tests réalisés en laboratoire physique, les valeurs moyennes sur 3 essais dans chaque condition ont été calculées pour les chaussures (moyenne de la chaussure droite et gauche) de chacun des participants puis ont été moyennées entre les 6 participants.

Le test de Shapiro-Wilk a confirmé la distribution normale des données. Des ANOVAs à mesures répétées à un facteur (RStudio : Integrated Development Environment for R, Boston, MA) ont été utilisées pour tester l'influence de l'usure. Le niveau de signification a été fixé à $p < 0,05$. Tous les effets significatifs ont été suivis par des tests post hoc de Tukey.

2.3. Résultats

2.3.1. Nombre de pas réalisés et temps de vieillissement effectué

Les résultats du nombre de pas réalisés et du temps nécessaire pour atteindre les paliers (nombre de jours pour atteindre les 30 ou 60 jours effectifs d'usure) sont présentés sur la [Figure 11](#).

Pour le nombre de jours afin d'atteindre les paliers (Figure 11. A), la durée médiane pour atteindre le premier palier de 30 jours effectifs d'usure est de 160 jours. Elle atteint 260 jours pour le palier à 60 jours effectifs d'usure. Ces durées sont très variables entre participants (du simple au double entre le premier et le troisième quartile). Ces durées sont très longues et la variabilité inter-sujets peuvent notamment s'expliquer par le fait que l'expérimentation s'est déroulée au cours d'une période où les participants étaient majoritairement en télétravail (du fait du contexte sanitaire) avec des profils de télétravail très différents.

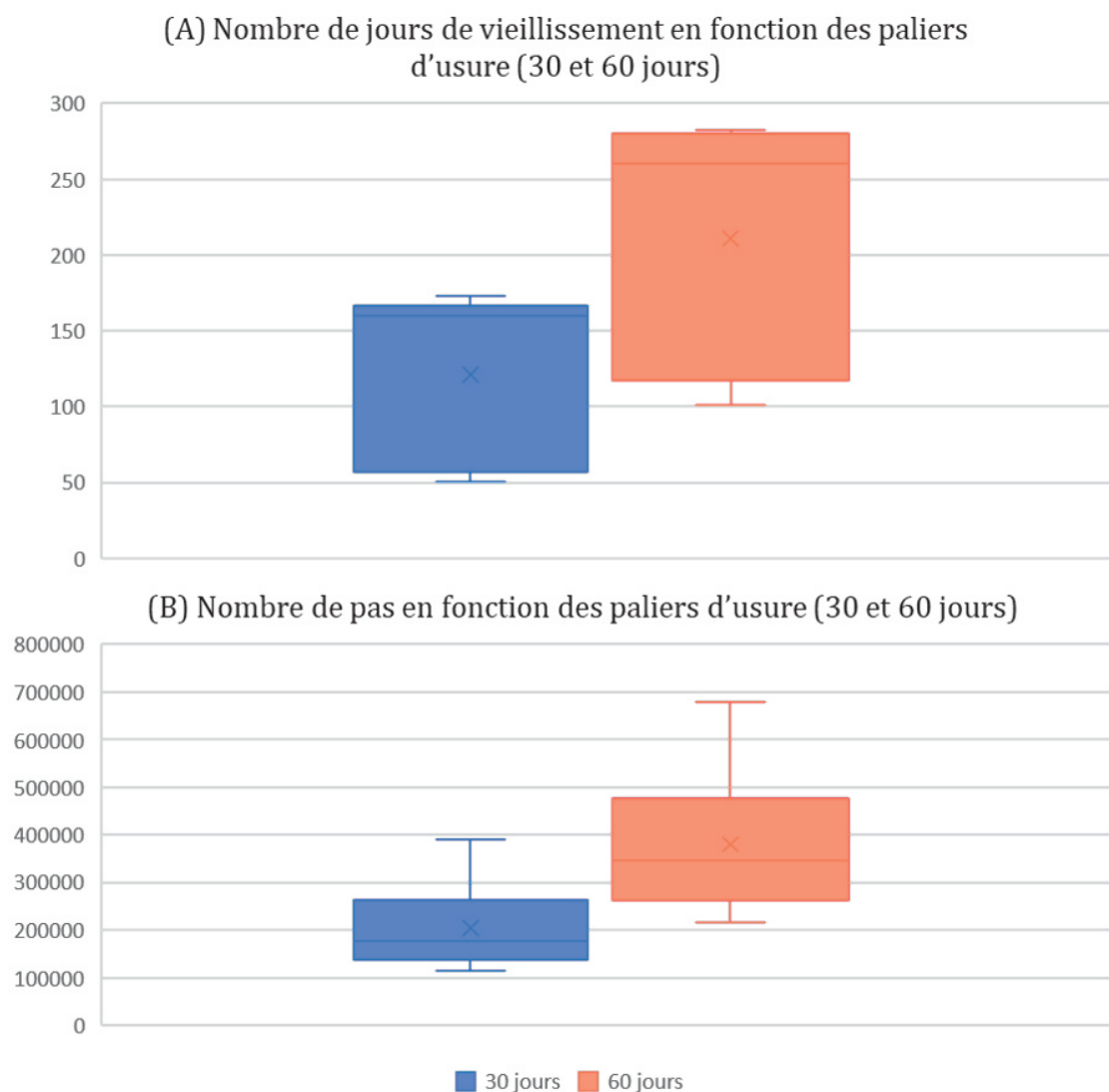


Figure 11 : Boîte à moustache représentant (A) le nombre de jours de vieillissement (B) le nombre de pas réalisé par les sujets durant l'expérience d'usure avec en bleu le nombre de pas après 30 jours d'usure et en rouge le nombre de pas après 60 jours d'usure.

Pour le nombre de pas ([Figure 11. B](#)), au bout des 30 premiers jours de test, les participants avaient réalisé 178 168 pas en médiane avec pour 1^{er} quartile 138 649 pas et pour 3^{ème} quartile 262 423 pas. Puis à la suite des 60 jours de test, les participants avaient réalisé 346 245 pas en médiane avec pour 1^{er} quartile 262 435 pas et pour 3^{ème} quartile 476 752 pas. La variabilité interindividuelle est importante, du fait des profils professionnels variés des participants, mais elle ne masque pas la différence de nombre de pas effectués entre le premier et le deuxième palier.

2.3.2. Analyse des tests physiques

Après 30 jours d'utilisation des chaussures, les tests physiques ont révélé une diminution significative de l'absorption des chocs au niveau du talon et de la résistance en flexion par rapport au test initial (0 jour). Aucun autre changement n'a été observé entre le test intermédiaire à 30 jours et le dernier test à 60 jours ([Tableau 1](#)).

Tableau 1 : Résultats des tests physiques en fonction du nombre de jours d'utilisation de la chaussure Adidas Stan Smith. *Différence significative entre le test initial et le test intermédiaire. **Différence significative entre le test initial et le test final.

Variables dépendantes	Test initial (0 jours)	Test intermédiaire (30 jours)	Test final (60 jours)
Absorption des chocs au niveau du talon (%)	24,4 (7,9)	10,1 (10,6) *	8,2 (7,8) **
Résistance à la flexion (daN)	0,636 (0,07)	0,298 (0,06) *	0,320 (0,07) **

2.3.3. Analyse de la marche à 3 km/h

Les résultats pour les essais de marche à 3 km/h sont présentés dans le [Tableau 2](#) et [Tableau 3](#).

On n'observe pas de changement au niveau temporel dans les variables de la marche à 3 km/h après 60 jours d'usure malgré une tendance à ce que le pic actif apparaisse plus tard dans la dynamique du pas ($p = 0,066$) ([Tableau 2](#)).

Concernant les variables dynamiques, on n'obtient qu'une tendance à ce que le pic de poussée augmente avec l'usure de la semelle à 60 jours ([Tableau 2](#)).

Au niveau des variables cinématiques on observe une tendance à la diminution de la vitesse verticale à l'impact entre le test initial (0 jour) et les suivants à 30 et 60 jours ($p = 0,084$). Ceci n'a pas d'impact sur les autres variables cinématiques ([Tableau 3](#)).

Tableau 2 : Résultats dynamiques des tests biomécaniques de la marche à 3 km/h en fonction du nombre de jours d'utilisation de la chaussure Adidas Stan Smith.

Variables dépendantes dynamiques	Test initial (0 jours)	Test intermédiaire (30 jours)	Test final (60 jours)	p
Temps de contact (s)	0,871 (0,02)	0,880 (0,02)	0,875 (0,04)	0,836
Temps de montée du pic passif (% phase d'appui)	26,6 (3,2)	26,1 (3,1)	26,2 (2,6)	0,730
Pic passif (BW)	1,02 (0,02)	1,02 (0,01)	1,02 (0,02)	0,355
Taux de charge (BW/s)	5,06 (1,16)	4,83 (0,96)	5,04 (0,75)	0,586
Temps du pic actif (% phase d'appui)	73,1 (1,2)	73,8 (1,7)	74,1 (1,1)	0,066
Pic actif (BW)	1,01 (0,04)	1,01 (0,03)	1,03 (0,04)	0,349
Temps du pic de freinage (% phase d'appui)	18,3 (0,7)	17,9 (0,7)	19,0 (3,1)	0,543
Pic de freinage (BW)	-0,12 (0,01)	-0,12 (0,02)	-0,12 (0,01)	0,298
Temps du pic de propulsion (% phase d'appui)	84,8 (1,0)	85,2 (0,8)	85,3 (0,9)	0,332
Pic de propulsion (BW)	0,13 (0,01)	0,13 (0,01)	0,14 (0,05)	0,074

Tableau 3 : Résultats cinématiques des tests biomécaniques de la marche à 3 km/h en fonction du nombre de jours d'utilisation de la chaussure Adidas Stan Smith.

Variables dépendantes cinématiques	Test initial (0 jours)	Test intermédiaire (30 jours)	Test final (60 jours)	p
Angle d'attaque (°)	19,1 (4,2)	18,6 (3,3)	18,3 (4,3)	0,758
Vix (mm/s)	614,3 (46,3)	595,9 (95,2)	649,1 (71,9)	0,234
Viz (mm/s)	-60,7 (19,4)	-39,9 (24,4)	-40,6 (28,0)	0,084

2.3.4. Analyse de la marche à 5 km/h

Les résultats pour les essais de marche à 5 km/h sont présentés dans le [Tableau 4](#) et le [Tableau 5](#).

A 5 km/h, on observe une différence significative dans la dynamique d'arrivée du pic de poussée ($p = 0,006$). Cette différence se situe en post-hoc entre le test initial (0 jour) et le dernier test à 60 jours où le pic passif arrive plus tard dans le pas ([Tableau 4](#)).

Tableau 4 : Résultats dynamiques des tests biomécaniques de la marche à 5 km/h en fonction du nombre de jours d'utilisation de la chaussure Adidas Stan Smith. **Différence significative entre le test initial et le test final.

Variables dépendantes dynamiques	Test initial (0 jours)	Test intermédiaire (30 jours)	Test final (60 jours)	p
Temps de contact (s)	0,657 (0,01)	0,661 (0,02)	0,657 (0,01)	0,718
Temps de montée du pic passif (% phase d'appui)	23,5 (0,9)	23,2 (1,1)	23,6 (1,2)	0,251
Pic passif (BW)	1,13 (0,04)	1,14 (0,02)	1,14 (0,03)	0,713
Taux de charge (BW/s)	7,83 (0,63)	7,89 (0,86)	7,64 (0,54)	0,329
Temps du pic actif (% phase d'appui)	77,6 (1,0)	77,5 (1,1)	77,9 (0,9)	0,092
Pic actif (BW)	1,18 (0,05)	1,20 (0,06)	1,18 (0,05)	0,205
Temps du pic de freinage (% phase d'appui)	18,3 (1,4)	17,7 (0,7)	17,7 (1,4)	0,254
Pic de freinage (BW)	-0,21 (0,01)	-0,21 (0,02)	-0,21 (0,01)	0,296
Temps du pic de propulsion (% phase d'appui)	85,7 (1,2)	85,9 (1,2)	86,2 (1,1) **	0,006
Pic de propulsion (BW)	0,23 (0,02)	0,23 (0,01)	0,24 (0,01) **	0,012

Tableau 5 : Résultats cinématiques des tests biomécaniques de la marche à 5 km/h en fonction du nombre de jours d'utilisation de la chaussure Adidas Stan Smith. *Différence significative entre le test initial et le test intermédiaire.

Variables dépendantes cinématiques	Test initial (0 jours)	Test intermédiaire (30 jours)	Test final (60 jours)	p
Angle d'attaque (°)	24,1 (3,7)	21,6 (3,5)	23,2 (3,3)	0,080
Vlx (mm/s)	799,7 (92,1)	762,0 (140,5)	819,9 (109,0)	0,148
Vlz (mm/s)	-70,6 (44,8)	-37,2 (46,6) *	-51,9 (53,1)	0,038

Pour les variables dynamiques, le pic de poussée augmente de manière significative au cours des essais ($p = 0,012$), et plus particulièrement entre le test initial et le dernier test à 60 jours. Aucune autre variable ne montre de différence significative au niveau dynamique (Tableau 4).

Au niveau cinématique, l'angle d'attaque a tendance à diminuer entre le test initial (0 jour) et le test intermédiaire à 30 jours. Il ré-augmente ensuite entre ce test à 30 jours et le dernier test à 60 jours ([Tableau 5](#)).

La vitesse verticale du talon à l'impact montre également une différence significative ($p = 0,038$) ([Tableau 5](#)). On observe en Post-Hoc que cette différence concerne une diminution de la vitesse d'impact talon entre le test initial et le test intermédiaire à 30 jours.

2.4. Discussion

2.4.1. Nombre de pas et temps de vieillissement

Pour atteindre les 30 jours effectifs d'utilisation de la chaussure, les participants ont mis 23 semaines et ont réalisé 178 168 pas en médiane et, pour atteindre les 60 jours d'utilisation, 37 semaines et 346 245 pas en médiane. En comparaison, les études d'usure avec des testeurs humains s'étendent sur une amplitude de 16 à 32 semaines (Cornwall & McPoil, 2017; Herbaut et al., 2017; Jafarnezhadgero et al., 2020, 2021; Kong et al., 2009). Nous pouvons voir que nous sommes situés dans la partie haute de cette étendue. Cependant contrairement aux autres études, nous avons fait le choix d'autoriser les participants à marcher avec leurs chaussures uniquement durant leurs jours de travail en entreprise afin d'essayer de standardiser notamment : le temps de port des chaussures et la nature du sol sur lequel les chaussures étaient en contact. L'objectif était d'aller le plus loin possible dans le vieillissement des chaussures durant une année et idéalement de créer des dégradations visuelles (trous dans la tige, abrasion de la semelle, etc.). Pour cela, des paliers d'usure tous les 30 jours effectifs d'utilisation ont été prévus avec un temps minimum pour atteindre ces paliers de 6 semaines pour les participants. Néanmoins, l'expérimentation n'a pas pu se dérouler comme prévu à cause de divers raisons (crise Covid et mise en place du télétravail). Nous n'avons donc pu faire que deux paliers d'usure et aucun des participants n'a pu réaliser, de par son utilisation, de dégradations visuelles importantes sur les chaussures.

2.4.2. Vieillissement des propriétés mécaniques des chaussures

On observe une dégradation assez rapide des caractéristiques mécaniques de la chaussure qui apparaît après 30 jours d'utilisation mais qui ne semble pas être modifiée au-delà. En effet, dans notre étude, cela s'est traduit par une diminution significative de l'absorption des chocs au niveau du talon et de la résistance en flexion par rapport au test initial (0 jour), avec une perte respectivement de 58 % et 53 % au bout de seulement 30 jours d'utilisation ([Tableau 1](#)). Cependant, cette diminution n'a que peu évolué par la suite entre le test intermédiaire (30 jours) et le test final (60 jours), avec d'un côté une diminution de 18 % de l'absorption des chocs au niveau du talon et de l'autre une augmentation de 7 % de la résistance en flexion entre ces deux paliers d'usure ([Tableau](#)

1). Notre diminution au bout du test final (60 jours) est bien plus importante que pour Herbaut et al. 2017, qui observe une diminution de 18 % de la capacité à dissiper l'énergie après un vieillissement de 4 mois réalisé par des jeunes participants portant une chaussure de course à pied. Cet écart peut s'expliquer par la différence des produits chaussants (chaussure de ville contre chaussure de sport) avec notamment la qualité des produits utilisés pour fabriquer les chaussures et les techniques de fabrication mais également par le fait que nos deux tests mécaniques ont des caractéristiques différentes. Si l'on regarde cette fois les résultats de Lippa et al. (2019), notre diminution semble similaire puisqu'ils ont montré que la capacité d'absorption d'énergie des chaussures de course était réduite en moyenne de 53,9 % après un vieillissement de la chaussure de seulement 42 km simulé par machine. En effet, pour Lippa et al. (2019), le vieillissement de la chaussure est réalisé à l'aide d'un banc de fatigue mécanique et nous savons qu'il peut y avoir une perte plus importante des propriétés mécaniques des chaussures avec ce genre de méthode comparée à l'usure réalisée par les testeurs humains (Cook et al., 1985). Il est ainsi complexe de confronter nos résultats avec la littérature puisque les chaussures, les méthodes d'usure (banc de fatigue mécanique/ testeurs humains) et les activités réalisées (marche/course) sont différentes. Cependant les résultats sont concordants sur la manière dont évoluent les propriétés mécaniques des chaussures avec l'usure. Dans notre cas, il nous est possible de dire qu'un seuil d'usure existe au bout de 30 jours d'utilisation pour les variables caractérisant l'absorption des chocs au niveau du talon et de la résistance en flexion des chaussures de ville. Néanmoins, il est probable que ce seuil intervient plus tôt dans la vie de notre chaussure de ville. En effet, Lippa et al. (2019), ont observé des modifications mécaniques des chaussures de course à pied dès les premiers kilomètres (0 à 10 km) de vieillissement. Ces variables n'ont ensuite plus évolué par la suite du vieillissement, comme dans notre cas.

2.4.3. Effet du vieillissement de la chaussure sur la biomécanique de la marche

Pour les tests biomécaniques de marche à allure lente à 3 km/h, on voit qu'après 60 jours d'utilisation, les variables caractérisant la dynamique et la cinématique sont similaires entre les chaussures neuves et les chaussures usées. Nous n'observons pas de changement significatif. L'usure de la chaussure n'a pas impacté les paramètres temporels de la marche, au niveau des temps d'apparitions des indices d'intérêts durant la phase de contact du pied avec le sol. De même, les paramètres dynamiques quantifiant les phases de freinage et de propulsion ne voient pas leur valeur évoluer à la suite du test final (60 jours). Pour les tests biomécaniques de marche à allure rapide de 5 km/h, le bilan semble être le même. Les variables dynamiques à l'état initial (0 jour) observées sont d'ailleurs dans la même amplitude que celles mesurées par Jafarnezhadgero et al. (2020), dont la vitesse de marche était de 1.3 m/s (soit 4.6 km/h). Nous observons uniquement pour la phase de propulsion une modification avec le pic de poussée qui se produit plus tard dans le temps et avec une composante de force de réaction antéro-postérieure plus importante avec le vieillissement des chaussures. Cela peut être relié à la perte de rigidité de la

chaussure en flexion. Une moindre rigidité pourrait en effet être compensée par une phase propulsive plus importante et plus tardive dans le cycle de marche. Cependant, ces résultats contrastent avec ceux de Jafarnezhadgero et al. (2020) qui réalisent également une analyse de l'activité de la marche. En effet, ils trouvent que la force verticale (pic passif et actif) et la force antéropostérieure (pic de freinage et de poussée) ont diminué après un vieillissement de 6 mois d'utilisation. Ils observent également que le taux de charge diminue avec le vieillissement des chaussures. Cette incohérence pourrait être due à des approches méthodologiques différentes entre les deux études avec : pour nous, des participants masculins avec une chaussure de ville ; pour eux, des participants féminins avec une chaussure de sport. Pour Jafarnezhadgero et al. (2020), ils justifient ces résultats par des actions de mécanismes compensatoires du système neuromusculaire ainsi qu'à une cinématique modifiée des membres inférieurs et/ou du tronc lors de la marche avec des chaussures usagées mais aucune acquisition cinématique n'avait été réalisée.

Ainsi, nos résultats peuvent s'expliquer soit parce que les sujets se sont adaptés biomécaniquement pour obtenir un "pattern" temporel et dynamique semblable à chaque test, soit parce que les chaussures ne se sont effectivement pas assez usées durant le temps de port et les sujets n'ont pas eu à s'adapter. Un élément de réponse provient des indicateurs cinématiques (angle d'attaque et vitesse d'impact du pied), qui nous renseignent sur une éventuelle adaptation des sujets aux modifications des propriétés mécaniques de la chaussure. A 3 km/h, la valeur de l'angle d'attaque et de la vitesse horizontale au moment de l'impact ne changent pas significativement suivant le vieillissement des chaussures. C'est également le cas pour la vitesse verticale avant impact. On observe seulement une tendance ($p = 0.084$) de la valeur de la vitesse verticale au moment de l'impact après 30 jours. Ceci peut être dû à la diminution de la capacité de la semelle à absorber le choc au niveau du talon. Cette diminution des capacités peut avoir conduit les sujets à diminuer leur vitesse seulement au moment du contact sans ensuite engendrer de modifications sur le déroulé du pas au niveau temporel, cinématique, ou dynamique. A 5 km/h, on observe également une différence au niveau de la vitesse d'impact verticale qui diminue entre le test initial (0 jour) et le test intermédiaire (30 jours). Cette différence peut être expliquée par les mêmes raisons que pour le test de marche à 3 km/h.

Si nous regardons ce qui se passe du côté des angles articulaires du membre inférieur à la course, d'après Herbaut et al. (2017), aucune différence significative entre les chaussures usagées et neuves n'a été observée pour les angles de la cheville et du genou lors de l'impact du pied avec le sol en course à pied. Cependant, le pic d'impact de la force verticale était similaire entre les chaussures usagées et neuves, mais le temps pour atteindre ce pic était plus court avec les chaussures usagées, ce qui a entraîné par conséquent une augmentation du taux de chargement significatif de plus de 23 %. Néanmoins, Kong et al. (2009) n'observent quant à eux aucune modification du taux de chargement avec le vieillissement des chaussures et pourtant la cinématique à l'instant du contact du pied avec le sol reste également inchangée entre les chaussures neuves et usées. Ces résultats indiquent que les coureurs ne sont pas en mesure d'ajuster la

cinématique des articulations de la cheville et du genou avant l'impact afin de minimiser l'amplitude du choc. Il semblerait que les ajustements cinématiques arrivent plus tardivement durant la phase d'appui. En effet, des différences cinématiques dans le plan sagittal sont observées lors de la transition entre les phases de freinage et de poussée pour l'articulation de la cheville (dès 41 % du cycle) pour Herbaut et al. (2017) alors que Kong et al. (2009) observe ces modifications bien plus tôt dans le cycle (dès 10 % du temps de contact). Cette modification peut expliquer que le taux de chargement reste inchangé pour Kong et al. (2009). Les coureurs adultes semblent être capables de modifier leurs cinématiques plus tôt durant la phase d'appui comparé aux enfants afin de maintenir des charges externes constantes. Concernant l'angle d'attaque du pied avec le sol, nous n'observons aucun changement avec le vieillissement des chaussures et cela se confirme avec les résultats de la littérature (Herbaut et al., 2017).

Dans notre expérience et avec la littérature, il nous est impossible de dire qu'un seuil d'usure existe en utilisant les variables issues de tests biomécaniques.

2.5. Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre était d'étudier la manière dont les propriétés mécaniques des chaussures se dégradent au cours de leur usage et de mesurer l'impact de ces dégradations sur la cinématique et la dynamique de la marche des testeurs humains. Ces informations sont essentielles afin de pouvoir programmer le pilotage du simulateur mécanique (cf. Chapitre 3 : Simulateurs mécaniques imitant la phase de contact du pied avec le sol) mais également afin de pouvoir valider les résultats des diverses simulations d'usure réalisées sur machine (cf. Chapitre 4 : Tests de simulation mécanique d'usure pour une activité de marche)

L'expérience a permis de montrer que durant une activité de marche, nous étions capables de définir un seuil d'usure de 30 jours d'utilisation pour les variables caractérisant l'évolution des propriétés mécaniques. De même, nous avons pu voir que la dégradation des propriétés mécaniques d'une chaussure de ville n'avait que peu voire pas d'influence sur la cinématique et dynamique de la marche humaine. Néanmoins cela ne semble pas être le cas pour la course à pied. Il est donc possible que lors des simulations d'usure mécanique avec notre machine (cf. Chapitre 4 : Tests de simulation mécanique d'usure pour une activité de marche), nous n'ayons pas à modifier notre trajectoire de simulation afin d'essayer de réaliser une usure similaire à la vraie vie lors d'une activité de marche.

Pour finir, nous avons pu nous rendre compte, comme cela est déjà énoncé dans la littérature, de la difficulté de mener à bien une étude longitudinale sur une si longue période. Il est par conséquent réellement intéressant de mener à bien le pilotage d'un simulateur mécanique afin de réaliser une usure la plus similaire possible à la vraie vie afin de s'affranchir des nombreuses contraintes qu'engendrent les tests d'usure avec des participants humains.

Chapitre 3 : Simulateurs mécaniques imitant la phase de contact du pied avec le sol

3.1. Revue de littérature sur les simulateurs existants

3.1.1. Introduction

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre ci-dessus, la réalisation des tests d'usure « au porté » confirme la difficulté de cette approche et renforce la nécessité de mettre au point une machine de test qui reproduirait un cycle de marche et/ou de course à pied. L'objectif de cette partie est de faire le point sur les machines et tests réalisés jusqu'alors permettant d'effectuer ce mouvement et de voir si elles proposent de l'usure de chaussures ou simplement une caractérisation du produit à l'état neuf. Cette partie est présentée sous la forme d'une revue de littérature soumise au journal : Sports Engineering and Technology qui couvre à la fois le développement de nouveaux produits et équipement sportif (vêtements, chaussures, etc.) mais aussi l'instrumentation et les processus qui rendent possibles les progrès du sport. La section 3.1.2 est donc rédigée en anglais et suit le format classique d'un article scientifique. Cette revue se concentre sur les études présentes dans les bases de données scientifiques (articles, actes de conférence) et thèses de master ou de doctorat. En parallèle, une exploration importante de la littérature grise (brevets et description de machines présentes dans les différents centres de tests à l'international, notamment apparaissant sur des sites web) a été menée. Les résultats sont placés en annexe de cette revue.

3.1.2. Scoping review (Shoe wear test machine: what exists vs. innovations and promising concepts)

3.1.2.1. Introduction

Manufacturers of sports or everyday shoes most often seek to test their products under real conditions of use in order to determine their performance, comfort and safety. There are basically three main different approaches in the scientific literature to perform this evaluation: wear tests or tests on human participants, physical tests and virtual tests. Wear tests and physical tests are the most commonly used in most centers of expertise relating to footwear. Using these approaches, it is possible for shoe manufacturers to test their product at any point in time, with or without prior wear.

The wear testing or human participant testing approach (testing performed on humans under ecological conditions) is the most realistic condition for testing footwear. Nevertheless, drawbacks of this approach are: the duration of the test, the variability of the performance (Bates et al., 1983), and the limited number of participants or tests per participants (Odenwald, 2006). The results of this method can be greatly affected by factors such as the subject's weight, the way of walking or running, the level of activity, the surface of the ground or even the environmental conditions which are difficult to measure and control. Wear tests can be a relevant answer, but require a significant human and financial investment associated with a relatively long study time. So most often, physical tests are carried out.

The physical tests are easy to use, simple to adjust and the values are reproducible (Cook et al., 1985) but they are sometimes far from ecological situations. Indeed, physical tests do not consider the shoe as a whole, but only one of its characteristics: a test corresponds to the measurement of a single characteristic (shock absorption, resistance to longitudinal bending, etc.) of the shoe. Thus, physical tests make it possible to classify the materials composing the different shoes and having specific mechanical capacities rather than directly characterize the real performances of the latter.

A final approach seems to be virtual testing with endless testing possibilities using only computer software. However, this approach remains complex and rarely used because of the complexity of the modelled objects (geometrical shape of object including many components, sensitivity to boundary conditions, uncertainty of the material properties, etc.) (Mara, 2007).

Recently a new kind of test has appeared, by combining human participant testing and physical test. This new type of test can be described as a controlled mechanical test which imitates the phase of contact of the foot with the ground, from the attack of the foot to the take-off of the toes. The goal is that the tested shoes are subjected to the same dynamics and kinematics constraints as in actual use. For this, it is necessary that interactions (reaction forces, pressure distribution and resulting kinematics) correspond to what would be applied by the wearer. The ancestor of these techniques is the shoe wheel which gradually tried to be replaced by industrial robots or special machines. Several approaches have been proposed these last years. They relied on various mechanical designs and control techniques and, consequently, produce different results regarding the fidelity of the shoe-ground interaction or the usability of the robot or machine. It thus seems necessary to review and summarize these different approaches in order to identify the most promising concepts and the remaining research tracks.

This study aims at providing a comprehensive review of the current literature on these mechanical tests to imitate the phase of contact of the foot with the ground.

3.1.2.2. Method

This review is based on the suggestions from Peters et al. (2015) and Munn et al. (2018) for scoping reviews. This review examines the peer reviewed studies which have studied the mechanical tests allowing to simulate the phase of contact with the ground of a shoe during a walking or running activity.

Table 6 : *Identified keywords and search strategies.*

	Test method	Result	Product
	1. Robo*	5. Kinematics	13. Shoe*
	2. Test* machine	6. Kinetics	14. Footwear
	3. Prosth*	7. Ground reaction force	15. Combine 13 or 14
	4. Combine 1 or 2 or 3	8. Accelerometry	
		9. Plantar pressures	
		10. Heel*	
		11. Simulation	
		12. Combine 5 or 6 or 7 or 8 or 9 or 10 or 11	
Final research	Combine 4 and 12 and 15		

An electronic literature search was performed using different databases (PubMed and Web of Science). Three keyword categories have been defined (test method, result and product) (Table 6). The search for these keywords was established for the titles, abstracts and keywords of the articles in the databases. The search strategy was common to all databases to capture eligible articles published from the inception of the database to 06 Avril 2022. Additional search was also carried out in order to identify possible research work such as thesis and/or master's manuscripts, which would not have appeared in the public databases, near the main teams working in this field. Likewise, for the sake of completeness, an electronic patent search was also performed using database Espacenet and a review of the existing test machines with the main world suppliers was also carried out. This list of patents (Table 10) and existing test machines (Table 11) will be placed in

appendix. These patents will not be discussed in this review because they represent concepts and not peer-review studies. Similarly existing machines that do not have the object of patent or scientific studies will not be discussed. This patent and existing machines search is thus given as an indication in order to show the diversity of machines, having been imagined and/or built, in order to imitate the phase of contact of the foot with the ground since the 20th century.

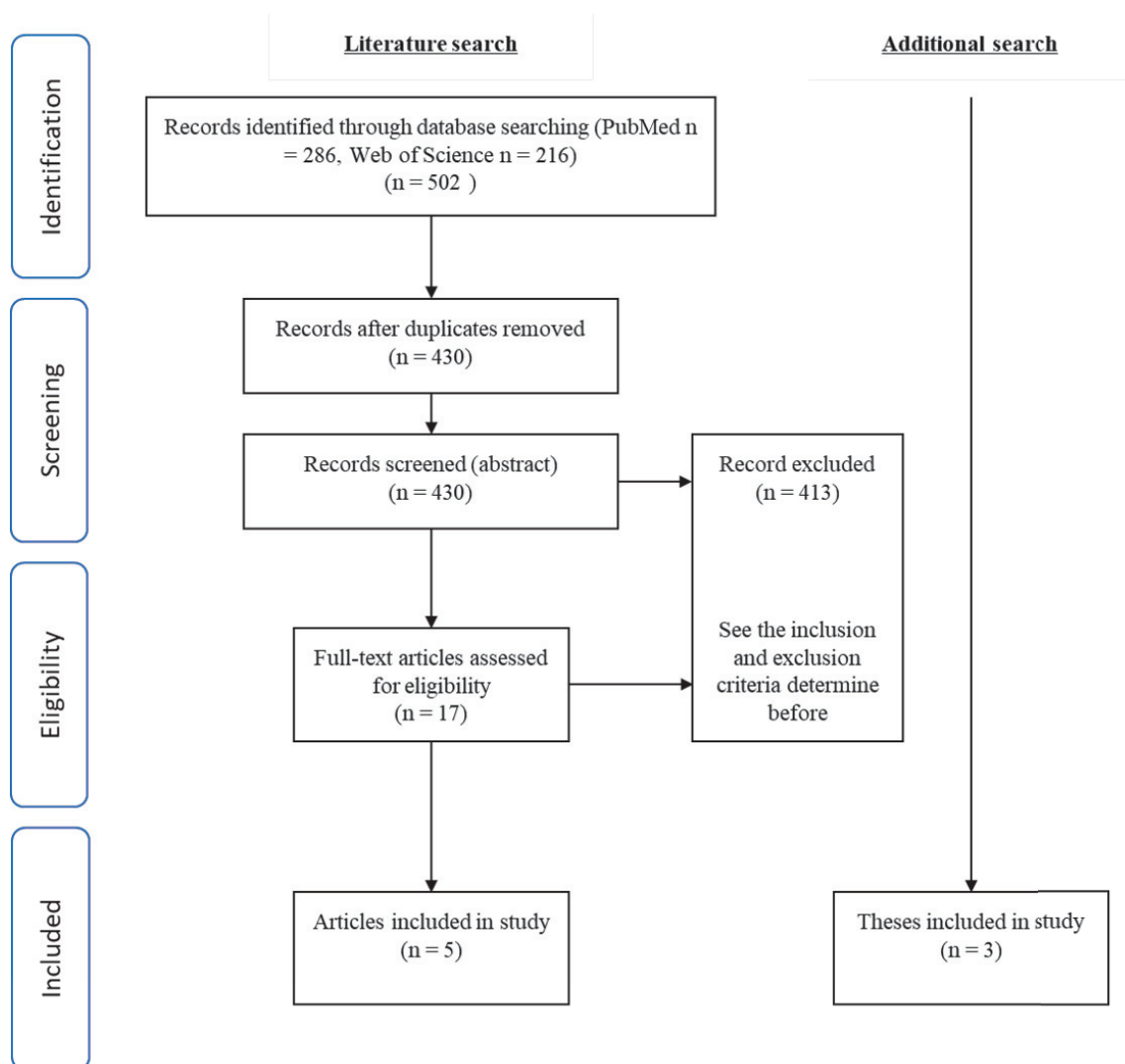


Figure 12 : PRISMA flow diagram.

This electronic literature search resulted in a total number of 502 studies being identified. Figure 12 gives an overview of the article selection process in accordance with PRISMA (Moher et al., 2009). After removing duplicates, the 430 remaining studies were screened by title and abstract to identify the studies to be included in this review. The inclusion and exclusion criteria for the systematic search is detailed below.

Inclusion:

- Studies describing a test method aiming at characterizing footwear in general.
- Studies in which the different parameters of shoes, affecting the performance, comfort and safety of shoes are analysed.
- Studies analysing walking or running activity.
- Studies with an available English language abstract.

Exclusion:

- Studies where shoes were not the primary or secondary focus of the research question.
- Studies examining mechanical tests that do not fully simulate the phase during which the foot is in contact with the ground (heel-to-toe).

Overall, 17 studies were retained after this screening step. They were further assessed in depth for eligibility. As a result, 5 studies and 3 theses met the inclusion criteria and, hence, were included in this review.

3.1.2.3. Results

The relevant characteristics of the 8 selected studies and theses are summarized in 7 to 9. They describe 7 different machines and set-up.

Six test machines (Jones, 2014; Lee et al., 2004; Mara, 2007; Nguyen, 2017; Ronkainen et al., 2010; Starker et al., 2014) consist of a rigid part moving relative to the ground and an end effector attached to the rigid part which comes into contact with the ground. The rigid part represents the human shank and the end effector is made up of the shoe and the foot-ankle complex. The test machine of Monckton & Chrystall (2002), rely on a similar principle but, it is the ground which moves relative to a fix end-effector.

Table 7 presents the summary of the results relating to the control of the test machines, Table 8 presents the summary of the results relating to the characteristics of the foot-ankle complex and Table 9 presents the summary of the results relating to the outputs of the mechanical tests.

Table 7 : *What type of controlled is used?*

Sources	Compliance management	Machine control					
		Type of control	Piloting data	Control loop	Movement orientation	Foot strike type	Maximum movement speed
Monckton et Chrystall 2002	Intermediate	Kinematics	Foot/ground angle from human data	No (just mentioned but not tested)	3D	-	3% of the speed of the human movement
Lee, Son, et Lee 2004; Lee 2009	Pilot	Kinematics	Robot arm joint angles from human data	No	2D (sagittal plane)	-	-
Ronkainen et al. 2010	Pilot	Kinematics and vertical offset to modulate the GRFz	Foot/ground angle + Position and speed of foot from human data	No	2D (sagittal plane)	Heel and forefoot without pronation or supination	Running at 13 km/h
Starker et al. 2014	Intermediate	Kinematics and GRFz	Foot/ground angle + GRFz from human data	Yes, only with GRFz data	2D (sagittal plane)	Heel without pronation or supination	-
Mara 2007	Passive	No piloting	Not clearly stated	No	2D (sagittal plane)	Heel without pronation or supination	-
Nguyen 2017	Pilot	Kinematics and kinetic control	Leg, ankle, MPJ and foot/ground angle + GRFz from human data	Yes, with kinematics and kinetics data	3D	Heel without pronation or supination	Running at 12 km/h
Jones 2014	Pilot	Kinematics control	Foot / ground angle + Position and speed of foot from human data	No	2D (sagittal plane)	Heel without pronation or supination	Walking at 5.4 km/h

Table 8 : How is the foot-ankle complex represented?

Sources	Shoe mount shape design			Heat and / or perspiration simulation
	Foot type	Degrees of freedom (DoF)		
Monckton et Chrystall 2002	Prosthesis (no model)	0 DoF only carbon stiffness	-	-
Lee, Son, et Lee 2004; Lee 2009	Rigid shape cut into three parts connected by two pieces of carbon blade	0 DoF only carbon stiffness	-	-
Ronkainen et al. 2010	Prosthesis (College Park Industries SOLEUS)	0 DoF only carbon stiffness	-	-
Starker et al. 2014	Prosthesis (Elite 2 Blatchford)	0 DoF only carbon stiffness	-	-
Mara 2007	Rubber leg with shock absorbers positioned at the ankle and hip	0 DoF only rubber stiffness	-	-
Nguyen 2017	3D printed foot with ankle and MTP piloted	2 active DoF (ankle dorsiflexion/plantar flexion and MPJ flexion)	-	-
Jones 2014	Prosthesis (Elite 2 Blatchford)	0 DoF only carbon stiffness	-	-

Table 9 : *What are the results in terms of biofidelity and shoe wear?*

Sources	Machine evaluation			Wear results
	Assessment tools	Kinematics results	Kinetics results	
Monckton et Chrystall 2002	6-DoF force cell	-	No results due to technical problems	-
Lee, Son, et Lee 2004; Lee 2009	Force platform	-	No walk or run test results, only impact tests	-
Ronkainen et al. 2010	Force platform Motion capture	Poor representation of the MPJ, lack of flexion, slower transition until the foot is flat for heel displacement.	Better correspondence of vertical force for a forefoot attack than heel attack. Horizontal reaction force remains negative. Contact time of 612ms for heelstrike and 331 for forefoot.	-
Starker et al. 2014	6-DoF force cell Motion capture	Shoe sole angle to the ground differ at initial contact and toe off.	Vertical force similar to reality if movement slowed. Contact time from 1.215 to 0.405s for test performed range from 20% until 60% of the real time and 0.304s for the higher frequencies > 80% of the real time.	-
Mara 2007	Force platform	-	Poor representation of ground reaction forces with several peaks.	-
Nguyen 2017	Force platform (3 sensors) Motion capture	Ankle and MPJ kinematics and shoe sole angle to the ground similar to human gait data.	Vertical force similar to reality if movement slowed. Poor representation of horizontal force with several peaks. No information of contact time but test was performed at 50% speed of the same running trial at 12km/h.	-
Jones 2014	Force platform Motion capture	Poor representation of the MPJ angle and slower transition until the foot is flat for shoe sole angle to the ground and heel displacement.	Vertical and horizontal ground force and CoP are different from reality with the horizontal force which remains negative. Contact time of 1.34s.	-

3.1.2.4. Discussion

Wear tests require reproducing biofidel mechanical loadings and deformations of the shoe. The main challenge comes from the fact that the ankle-foot-shoe system is complex with a compliance that varies along the gait cycle, with the gait velocity, between individuals (Bartlett et al., 2007; Preatoni et al., 2013) and along the wear test itself due to the deterioration of the shoe mechanical properties (Cook et al., 1985; Herbaut et al., 2017; Kong et al., 2009). We discuss the literature results presented in table 2 to 4 around three main topics: 1) What type of controlled is used? 2) How is the foot-ankle complex represented? 3) What are the results in terms of biofidelity and shoe wear?

3.1.2.4.1 What type of controlled is used?

Descriptions of mechanical test:

In comparison with existing test devices, the machines proposed in this review aim to simulate a phase of contact of the foot with the ground for different types of walking or running (from heel to toe). They must therefore have the ability to move their final effector relatively to the ground in order to manage the movements, speeds and angulations of the foot during the movement. But they also have to modulate the intensity of the interaction of the foot with the ground. This later depends on the relative kinematics between the end effector and the ground but also on the compliance of the contact system (ankle-foot-shoe).

Kinematics control and related problems:

Most of the studies reviewed propose a purely kinematic control (Jones, 2014; Lee et al., 2004; Mara, 2007; Monckton & Chrystall, 2002; Ronkainen et al., 2010). In most cases (Lee et al., 2004; Mara, 2007; Monckton & Chrystall, 2002; Ronkainen et al., 2010) the motion of the lower limb (where the end effector is rigidly attached) relative to the ground is imposed. The end effector can be moved in a 2D (sagittal plane only) (Jones, 2014; Lee et al., 2004; Mara, 2007; Ronkainen et al., 2010) or 3D space (possibility of pronation and supination of the foot) (Monckton & Chrystall, 2002). The resulting motion of the different parts of the foot and the ground reaction force (GRF) are thus the result of the ankle-foot-shoe compliance. Only Jones (2014), uses alternative kinematics descriptor such as foot-ground angles. Depending on the construction of the machine, this end effector can be the foot (Lee et al., 2004; Mara, 2007; Ronkainen et al., 2010), that comes and impact a fixed ground, or the ground that is moved toward a fixed foot (Monckton & Chrystall, 2002). The kinematics trajectory imposed to this end effector usually refers to the human gait during walking or running. Still the reference trajectory used is usually not clearly described, except in Ronkainen et al. (2010) and Jones (2014). Moreover, the actual trajectory followed by the machine is influenced by the machine's controller option, in particular the smoothing of the reference trajectory (Jones, 2014; Monckton & Chrystall, 2002; Ronkainen et al., 2010). The smoothing of the control may also play a large role in the resulting contact loads (e.g. inducing huge contact forces if the reference trajectory tends to move the foot too close to the ground) but this parameter is rarely described.

Results and biofidelity obtained with this approach will be discussed in detailed in the last section. Overall, despite a good accuracy and repeatability of the controlled trajectories, none of these studies relying purely on kinematics controlled variables resulted in realistic shoe-ground interactions, whether for the GRF, center of pressure (CoP) or metatarsophalangeal joint (MPJ) angle (only Ronkainen et al. (2010) correctly replicated the vertical forces in forefoot running). It likely comes from the fact that the prosthetic ankle-foot complexes do not behave as those of real humans (different passive behaviour and lack of active component). This point, and the possible improvements proposed in some studies, will be discussed in the next section. Still, as a result, one of the main challenges for these machines is to adapt the input trajectories to get realistic interactions.

Other possibilities of control:

Few studies proposed an alternative control strategy to overcome this limitation. It consists of controlling not only the kinematics of the end effector attachment but also to include information on the ground reaction forces. In Starker et al. (2014) and Nguyen (2017), the vertical force curve is monitored and compared to the human reference. If the curve does not match, the displacement of the end effector is changed through the machine actuators to obtain the desired vertical force values. This approach led to interesting results, notably the possibility to reproduce both kinematics and some of the vertical GRF. Still, it implies much more advanced and complex controllers. Moreover, it does not solve all the issues: shear forces were not assessed or not really well reproduced, and the agreement with experimental data decreases with increasing speed. Note also that better results from Nguyen (2017) are also partly explained by the additional actuator place at the MPJ (see next section).

3.1.2.4.2 How is the foot-ankle complex represented?

Key points of the foot-ankle complex:

Anatomy of the human foot-ankle complex is very sophisticated. Indeed, the ankle is the last zone of localized and unidirectional mobility, below the DoFs mostly coupled as the foot is made of a multitude of passive and active components (offering great mechanical complexity with, as a corollary, great adaptability). It is therefore very difficult to reproduce its complex mechanical behaviour, in particular for situations such as the stance phase in walking or running that involved large foot deformations and muscle activations. However, a correct mechanical behaviour of the foot-ankle complex is a key feature to obtain realistic shoe-ground interactions and thus consistent shoe wear. This is even more critical for most studies where a purely kinematics control strategy of the lower limb based on experimental data is used (see previous section).

Passive foot-ankle complex:

Most of the studies reviewed used a passive prosthetic foot. Usually, it was a commercial prosthesis, used without modification (Jones, 2014; Monckton & Chrystall,

2002; Ronkainen et al., 2010). It usually led to a lack of toe flexion (see below). Two studies used a foot shape with specific places of flexion as a base (Lee, 2009; Lee et al., 2004). Kinematics of the foot obtained with these passive prostheses are different and far from that of a healthy human foot. The MPJ during the contact phase for the machine test is the reverse of the result with a human subject (Jones, 2014) or the MPJ angle presents a strong lack of flexion in comparison with the human foot during the second half of the stance phase (Ronkainen et al., 2010). Likewise, the angulation of the foot relative to the ground presents a slower transition until the foot is flat and the angulation values at the time of the toe off are less than in reality (Jones, 2014). It appears that the stiffness of the materials constituting the prostheses influences the data of the angle of the foot relative to the ground on contact due to parasitic dorsiflexion motion. In addition, the passive prostheses fail to recreate the propulsive horizontal force normally occurring during the second part of the support phase. This force is indeed generally considered to result from active muscle contraction and it has been shown in the literature about transtibial amputee gait that passive ankle and foot prostheses cannot deliver the same level of propulsive impulse as the one observe for a healthy person (Zmitrewicz et al., 2006).

Active foot-ankle complex:

Only one study proposed the use of an active foot-ankle complex: Nguyen (2017) designed a specific ankle-foot complex in which they pilot the ankle joint and the MPJ in the sagittal plane. It allows to finely control these joints kinematics but also to provide some energy at the end of the stance phase to better replicate the propulsion.

Alignment of the foot-ankle complex:

Prosthesis alignment (the exact position and orientation of the prostheses on the lower limb) is known to be one of the critical parameters to ensure an efficient gait in transtibial amputee (Hansen et al., 2003, 2004). We can expect that it is even more true for the test machines based on a purely kinematics control. Surprisingly, we found little or no information on the prosthesis alignments in the reviewed studies. At best, some studies (Hansen et al., 2003) describe the technic used to adjust the vertical position of the prosthesis.

3.1.2.4.3 What are the results in terms of biofidelity of the constraints and the wear?

Wear test:

The main objective of the machines proposed in this review is to emulate the shoe-ground contact phase during walking or running in order to reproduce the shoe wear observed in real life. As such, the validity of these machines would logically be the shoe wear obtained after a certain number of cycle (abrasion of the sole, decrease in the cushioning capacity of the sole, shoe upper tear, etc.) Still, none of the reviewed studies present results of wear tests for a long period of time. This point constitutes a clear lack in the current literature.

Foot kinematics and ground reaction forces:

An alternative way to evaluate the validity of the machines consists in assuming that the more accurately the test reproduces the actual shoe-ground interactions, the more representative will be the resulting shoe wear. This comparison is usually performed on the foot kinematics (foot angle with respect to the ground, MPJ angle, movement of the points of the foot, contact velocity, etc.) and foot-ground contact forces.

Regarding the kinematics of the foot, this seems to be strongly impacted by the choice of piloting of the simulator. Indeed, for 6-axis robots (Jones, 2014; Ronkainen et al., 2010), when we compare the position of the heel marker in sagittal plane, the foot angle with respect to the ground, or the MPJ angle with the ones of human walking, their representation is very poor when the robot is programmed by the method directly using human kinematics data. When the robot is programmed in a rotation method either around the heel with the intention of mimicking the first half of the ground contact or around the MPJ with the intention of mimicking the second half of the ground contact, the kinematic representation is visually better corresponding with human walking. Whatever the piloting method, it seems clear that the MPJ exhibited less flexion compared to the human foot (Jones, 2014), which is mainly explained by the choice of the end effector which is a rigid foot prosthesis with a carbon blade, which could possibly cause the upper of the shoe to wear differently. For foot impact speeds, heel speed during impact is different depending on the piloting method and it is generally lower than reality (Jones, 2014), which could lead to different wear of the sole of the shoe. For other machines with a control loop (Nguyen, 2017; Starker et al., 2014) it is easier to obtain a kinematics close to reality. For Nguyen (2017), the foot angle with respect to the ground and the MPJ angle are similar to those obtained with human running. This can be explained thanks to the end effector which is very different from other mechanical simulators since it is not a prosthesis but an articulated foot at the level of both ankle joint and MPJ with cable piloting. However, no information is provided on the impact speeds of the foot on the ground which strongly influence the wear of the shoe depending on its difference from reality.

Regarding the ground reaction forces, most studies are focused on replicating the vertical reaction force. During mechanical simulations, it is possible to reach the magnitude of the peaks for walking (Jones, 2014) or running activities (Nguyen, 2017; Ronkainen et al., 2010; Starker et al., 2014) (heel or midfoot striker). However, replicating the overall shape of the vertical reaction force requires adaptations of the kinematics such as a sequence of rotation around specific points of the end effector (Jones, 2014). These adaptations remain very specific to each mechanical simulator configuration (Jones, 2014; Nguyen, 2017). An actuated (Nguyen, 2017) or even passive (Starker et al., 2014) foot/ankle complex including a regulation loop on the vertical force gives better replication results but this is to the detriment of the contact time which is multiplied by two because of the actuators dynamics (Nguyen, 2017). However, vertical force is not the only force involved in shoe wear. The horizontal forces and the localization of the CoP

seem at least as critical for wear but rarely evaluated. Whatever the method and the end effector used for the mechanical simulation, we observe a lack or even no propulsion phase according to the anterior-posterior force (Jones, 2014; Nguyen, 2017; Ronkainen et al., 2010) and a displacement of the CoP whose amplitude is reduced along the anterior-posterior axis, which may be due to poor mobilization of the toe segment at the end of the simulation cycle (Nguyen, 2017).

Contact time:

Regarding the contact time, whatever the machine, it is always longer than reality. In addition, some simulators encounter limitations in their actuator and they are forced to reduce the speed of the test in order to keep the kinematics or the ground reaction forces of the test as close as possible to reality. Thus, Nguyen (2017) performs a running simulation at 50 % of the real speed of the test carried out with a human tester who would run at 12 km/h.

3.1.2.5. Conclusion

Mechanical tests mimicking the contact phase of the foot with the ground are still very rare in comparison with the physical tests or tests with human participants which are commonly used. Still, a variety of concepts and approaches are presented in the reviewed studies.

Existing machines presented in this review most commonly control the kinematics of an end effector, made of a shod passive prosthesis, relative to the ground. Few studies proposed to add a control of the vertical ground reaction force. It logically led to more realistic vertical contact forces but to the detriment of the complexity of the system and an increased contact-time. Moreover, it does not lead to realistic anterior-posterior reaction forces. Active propulsive forces were only obtained through the use of an active foot system with two joints (ankle and MPJ in the sagittal plane).

Nevertheless, whatever the end effector (prosthesis or active foot) and type of control used, the resulting foot kinematics and ground reaction forces are still difficult to compare to those of a real human when the machines simulate walking or running at realistic speed. Moreover, none of the reviewed studies present results of wear tests for a long period of time. As a result, we have no information on the possibility of these machines to reproduce faithful wear of the shoes. Also, we don't know if the shoe wear time with these machines will be faster or longer than the existing tests on human.

In addition, shoe wear is a result of various factors including those of the kinematics of the movement of the foot/ankle complex and the application of ground forces as described by the machines mentioned above. However, these are not the only factors, and none of these machines is for example interested in the different ground on which the human testers can walk or run, the heat produced by the foot and the possible friction areas between the shoe and the foot, to the perspiration evacuated by the foot during the activity or to other deteriorations that the external environment can cause. In view of all

this information, we can wonder if these machines will be able to actually recreate the wear of the shoes as in real life.

However, the results of these tests are encouraging and relatively new compared to physical tests and tests on human which have already been widely studied in the literature. Still mechanical tests require further research in order to simulate real walking or running activity for the purpose of wearing a shoe.

3.1.2.6. Appendix

Table 10 : Patent Appendix with number, title and year for each patent.

Number	Title	Year
WO2020245536A1	Mechanical walking and running simulator	2019
CN205093682U	Bionical mechanics abrasion wear test machine	2015
CN104504984A	Six-degree-of-freedom gait simulation testing device	2014
JP2016070715A	Testing method and a testing machine for a floor material	2014
US2016061700A	Apparatus and method for testing cushioning components	2014
CN103234850A	Sole frictional wear experiment machine	2013
KR101251452B	Apparatus for testing slip of shoes	2012
CN102579060A	Tandem experiment facility with five degrees of freedom for simulating ankle gaits	2012
CN102622936A	Parallel experimental device for six-degree-of-freedom gait simulation	2012
EP2578102A1	Machine for carrying out abrasion tests on shoe soles	2011
US2002029610A	Motion platform and method of use	2001
US6289743B	Shoe testing apparatus and method of use	1999
CN86206212U	Simulating high-speed wearing tester for shoes	1986
US4432223A	Footwear testing apparatus and method	1982
US4327572A	Wear tester for shoes	1980
US4130007A	Footwear tester	1976
US4096733A	Testing footwear soles	1975
US2638776A	Mechanical footwear testing machine	1947
US2048837A	Shoe flexing machine	1935
US2013643A	Apparatus for demonstrating the mechanical flexiblizing of shoes	1932

Patent appendix: the patent search focused more specifically on patent documents included in the following international or cooperative classes: A43D1/08 (Foot or last measuring devices; Measuring devices for shoe parts; Measuring devices for shoe parts)

and A43D999/00 (Footwear; Machines, tools, equipment or methods for manufacturing or repairing footwear; Subject matter not provided for in other groups of this subclass). This an electronic patent search made it possible to isolate 19 families of patent documents matching the keywords used for the literature search (Table 10).

Existing test machines appendix: electronic search on Google made it possible to isolate 5 of existing test machines matching the keywords used for the literature search (Table 11).

Table 11 : Existing test machines appendix with the name of the company, its location, the name of the machine or test in question and the web link.

Company	Location	Machine name	Link
Heeluxe	Goleta, California, United States	Time Machine Shoe Durability	https://www.heeluxe.com/heeluxe-durability/
SATRA Technology	Kettering, United Kingdom	STM 528 Pedatron	https://www.satra.com/test_equipment/machine.php?id=16
Soraco Test Equipment	Biella, Italy	Walking simulator EL-107	http://www.soraco.it/en/walking-simulator-el-107/
Giuliani Tecnologie	Turin, Italy	Scarpometro Walkmeter	https://www.giuliani.it/product-page/scarpometro-walkmeter?lang=en
Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation	Stuttgart, Germany	3D Test Systems	https://www.ipa.fraunhofer.de/en/expertise/biomechatronic-systems/test_systems_for_body_worn_products/3d_test_systems.html

3.1.3. Bilan et choix de conception pour le simulateur

Premièrement, nous pouvons voir que le choix de l'effecteur final (pied prothétique classique versus pied spécial actif) semble avoir un effet sur les résultats de la fidélité de la reproduction de la phase de contact du pied avec le sol (notamment sur la cinématique du mouvement). Malgré cet effet, il semble intéressant dans l'optique de création d'une nouvelle machine de garder comme effecteur final le pied prothétique classique (non actionné) car pour l'instant un pied « actif » reste trop complexe à intégrer. Cela complexifie en effet fortement le contrôle de la machine et la rend plus difficile à maintenir (actionneurs et capteurs supplémentaires). Il vaut mieux à la place réaliser des tests spécifiques de caractérisation de la compliance au niveau de l'interface du pied prothétique et du sol afin d'obtenir des abaques machine pour le pilotage du test d'usure de chaussures.

Deuxièmement, le pilotage de chacune de ces machines s'effectue uniquement dans le plan sagittal (en deux dimensions). Il est donc difficile d'orienter l'effecteur final de

manière à réaliser une abduction/adduction de la cheville dans le but de recréer un semblant de mouvement de supination/pronation du pied afin de réaliser des profils d'usure de chaussures différentes suivant l'axe longitudinal de la semelle. Il faudrait intégrer la possibilité de piloter l'orientation de l'effecteur final dans un espace en trois dimensions.

Troisièmement, nous avons pu voir que certains tests proposaient une boucle de rétroaction permettant de contrôler à la fois les efforts de contact du pied avec le sol mais aussi la cinématique angulaire de certaines articulations du membre inférieur par rapport à des données issues de tests biomécaniques (avec des testeurs humains). Ces boucles de rétroaction sont complexes à mettre en place et difficile à réaliser pour des mouvements rapides comme de la course à pied. Il est plus pertinent d'ajouter un degré de liberté sur les machines qui permettrait de gérer de manière active la compliance du pied avec le sol.

Finalement, les tests mécaniques reproduisant la phase de contact du pied avec le sol n'ont pas encore pu être testés pour réaliser de l'usure de chaussures. En effet, ils ne se sont intéressés pour l'instant qu'à la reproduction du mouvement lorsque la chaussure est neuve sans pour autant proposer une caractérisation des performances du produit. Quand bien même la simulation mécanique serait similaire à la phase d'appui du pied contre le sol (de façon cinématique et dynamique), nous n'avons aucune information concernant la faisabilité de ces machines à réaliser de l'usure de chaussure sur un nombre de cycles important.

3.2. Simulateur mécanique de CTC

3.2.1. Introduction

3.2.1.1. Contexte

En 2017, CTC Groupe a lancé un projet ayant pour but de permettre aux industriels français de la chaussure de tester leurs produits en condition réelle d'utilisation. L'objectif était de compléter la gamme des tests existants : tests « au porté » et tests physiques. La mise en place d'un tel projet répondait au besoin de créer un test qui permettrait à la fois de réaliser des essais proches de la réalité dans un temps réduit avec des moyens financiers et humains limités en comparaison des tests précédemment cités qui ne répondent qu'à un ou deux de ces critères à la fois. Pour cela, CTC Groupe ne disposant pas des moyens nécessaires pour réaliser le simulateur en interne et notamment la conception et la fabrication de la partie mécanique, a fait appel à un bureau d'étude (PROMECA Ingénierie, 1 Rue des Îles, 38420 Domène) pour la réalisation d'un simulateur mécanique de marche et de course à pied. Cette machine a été livrée à CTC début juillet 2019 sous la forme d'un prototype évolutif et non pas d'une machine finale de test pour les industriels français de la chaussure. Une partie de mon travail au cours de ces trois années a consisté à faire évoluer et mettre au point ce prototype. Le résultat de ces évolutions a permis de réaliser un test d'usure complet pour de la marche (cf. Chapitre 4

: Tests de simulation mécanique d'usure pour une activité de marche) et de générer des trajectoires réalistes pour différentes vitesses de marche et course (cf. Chapitre 5 : Génération de trajectoires de pilotage du simulateur mécanique). Cette machine est présentée dans le paragraphe suivant.

3.2.1.2. Objectifs

Plusieurs objectifs sont mis en avant dans cette partie :

- ❖ Présenter les spécifications du simulateur de marche et de course à pied dans son état final (sans détailler les différentes évolutions depuis la livraison du prototype).
- ❖ Aborder la façon dont la machine est programmée pour réaliser les activités de marche et course à pied.
- ❖ Permettre au lecteur d'avoir suffisamment de connaissances sur la machine pour comprendre les chapitres suivants.

3.2.2. Spécifications machine

Le simulateur de marche et de course à pied présente cinq degrés de liberté pilotés. Il est constitué de trois parties (Figure 13) qui sont : un effecteur final, un premier système de déplacement (partie supérieure) de ce pied permettant de réaliser un mouvement de translation horizontale et de rotation, un second système de déplacement (partie inférieure) permettant un mouvement de translation verticale du sol.

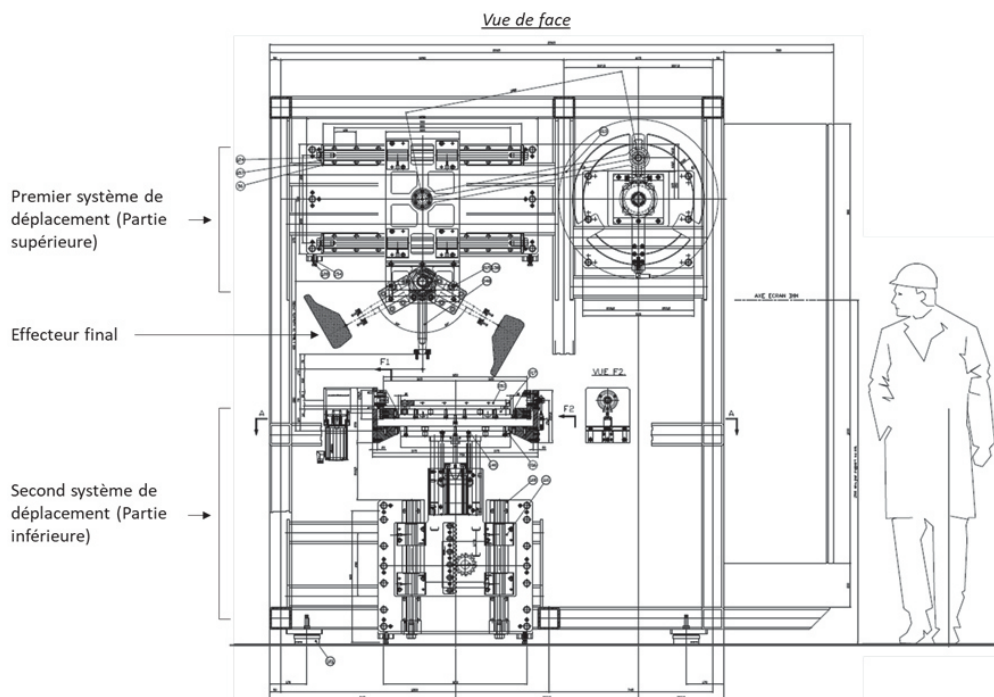


Figure 13 : Schéma du simulateur mécanique de marche et de course pied (vue de face).

Le système mécanique est composé de 5 actionneurs (4 moteurs et 1 vérin linéaire) dont le pilotage est une commande interpolée (synchronisé sur un axe virtuel permettant d'obtenir un mouvement interpolé comme une commande numérique).

3.2.2.1. Partie supérieure

Le premier système de déplacement permet d'entraîner l'effecteur final dans un mouvement simulant le mouvement d'une jambe humaine pendant la phase d'un cycle de marche ou de course (Figure 14). Pour cela, nous avons deux degrés de liberté au sens cinématique qui sont :

- Un système bielle/manivelle, actionné par un moteur, conçu pour déplacer un chariot selon la direction horizontale (action cinématique). La longueur de la manivelle (distance entre l'axe moteur du système bielle/manivelle et le pivot entre la manivelle et la bielle) peut être réglée entre les essais afin d'augmenter ou diminuer l'amplitude de déplacement horizontale du chariot.
- Un pivot entre le chariot et une pièce intermédiaire, au bout de laquelle se trouve l'effecteur final. Ce pivot est actionné par un moteur (action cinématique). Il représente grossièrement l'articulation du genou et la pièce intermédiaire joue le rôle de la jambe.

Le pilotage de ces deux moteurs permet ainsi de commander la position du chariot selon la direction horizontale et l'inclinaison de la pièce intermédiaire par rapport à la direction verticale, c'est-à-dire de simuler la position du genou et celle du tibia pendant le cycle de marche.

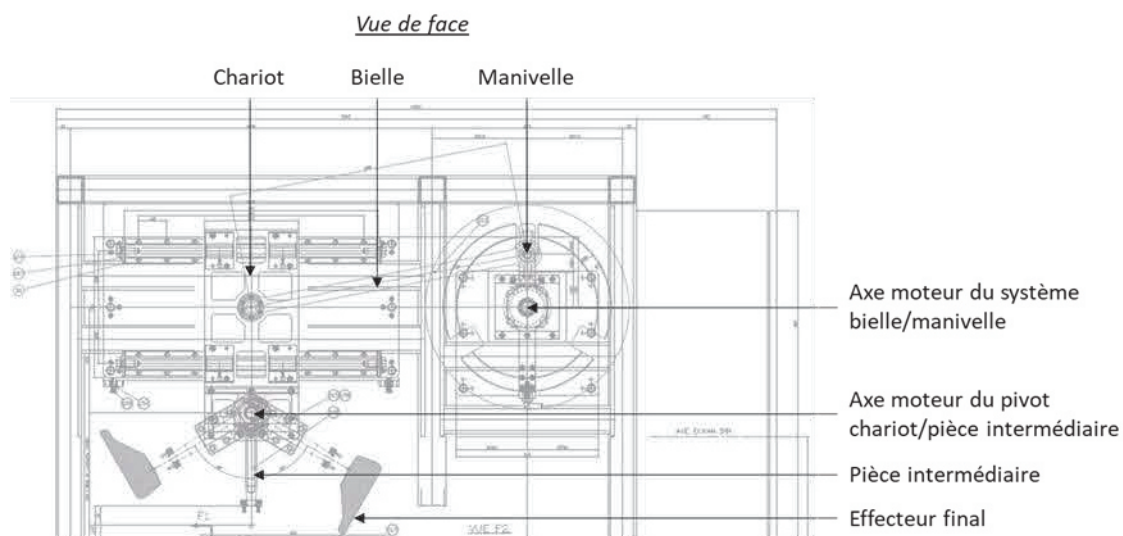


Figure 14 : Schéma du premier système de déplacement du pied du simulateur de marche et de course à pied.

3.2.2.2. Partie inférieure

Le second système de déplacement ([Figure 15](#)) permet de modifier la position verticale et l'orientation de la plaque représentant le sol. Pour cela, nous avons deux degrés de liberté au sens cinématique et un degré de liberté « dynamique » qui sont :

- Un système à crémaillère, actionné par un moteur, conçu pour piloter la position du sol selon la direction verticale (action cinématique).
- Un vérin pneumatique, actionné par un distributeur pneumatique, conçu pour réaliser une double action : extraire et/ou remonter rapidement le sol dans les phases hors contact et réguler la compliance de l'effecteur final avec le sol lors des phases de contact (action « dynamique »).
- Un système de rotation fixé sur le sol, actionné par un moteur, conçu pour réaliser une rotation du sol dans le plan frontal (action cinématique). Ce degré de liberté ne sera pas considéré dans la suite du manuscrit, ce qui permettra de se placer dans le cas d'un mouvement plan.

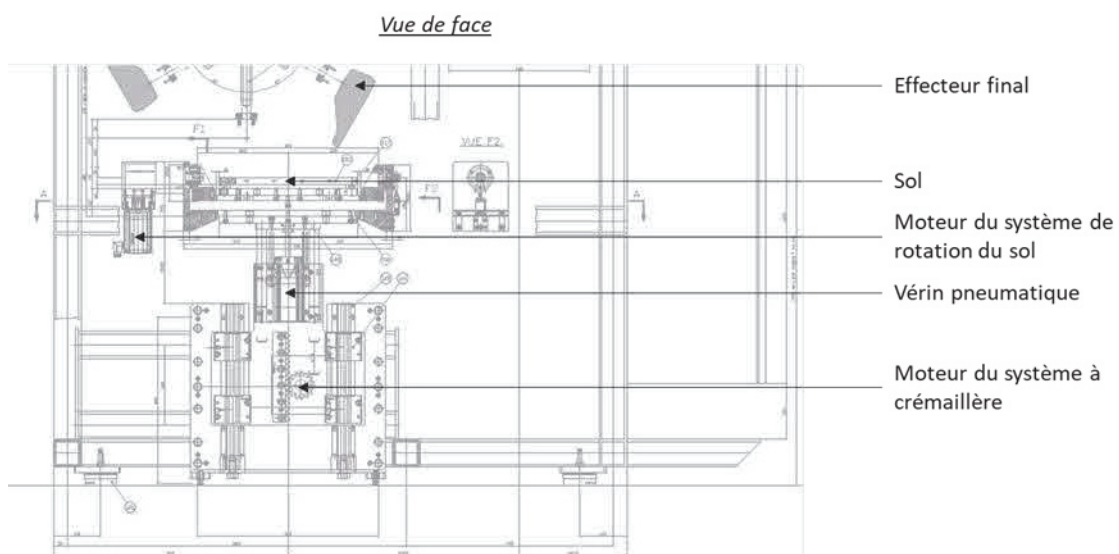


Figure 15 : Schéma du second système de déplacement du pied du simulateur de marche et de course à pied.

Ce double pilotage de la position verticale du sol et de la pression qu'il exerce sur l'effecteur final, permet de simuler à la fois la position du sol par rapport à l'effecteur final et la force avec laquelle l'effecteur final rentre en contact avec le sol au cours du cycle de marche. Le pilotage de rotation du sol, dans le plan frontal, a quant à lui pour objectif de simuler un mouvement de pronation et/ou de supination du pied. Le système pneumatique du vérin dispose d'un régulateur de pression qui permet théoriquement de garder une pression constante dans la chambre du vérin, indépendamment de

l'enfoncement de la tige du vérin dans cette chambre. Néanmoins, il existe une latence au niveau de la réponse du régulateur qui fait que la pression n'est pas réellement constante et peut donc être supérieure voire inférieure lors de changement brusque de pilotage.

3.2.2.3. Effecteur final

L'effecteur final du simulateur mécanique de marche et de course à pied est une prothèse qui est par la suite « chaussée » d'une chaussure à tester. La prothèse utilisée est une prothèse de la marque Össur (Grjothals 1 - 5, 110 Reykjavik, Iceland) avec son revêtement de pied anatomique. Le modèle est une Pro-Flex XC (Figure 16) qui est conçu pour les utilisateurs actifs qui aiment la randonnée et le jogging, ainsi que la marche. Le modèle utilisé sur le simulateur de marche et course à pied est de catégorie 5 en taille 27, il est utilisable par des personnes de 88 kg (ISO 10328).



Figure 16 : Prothèse Pro-Flex XC et revêtement de pied anatomique de la société Össur.

3.2.2.4. Instrumentation machine

Le simulateur mécanique de marche et de course à pied est instrumenté au niveau du sol à l'aide d'une plateforme de force, spécialement conçue par Kistler grâce à 4 capteurs de force à 3 composantes, mesurant 25 cm de large et 50 cm de long. La suite de la chaîne d'acquisition (Figure 17) se constitue d'un amplificateur et d'un châssis compactDAQ avec un module d'entrée analogique afin d'enregistrer les signaux à l'aide d'une application réalisée sous LabVIEW pour ensuite les traiter et les analyser sous Matlab. Des capteurs sont également présents au niveau des actionneurs du simulateur mécanique (capteurs linéaires et angulaires + capteur de pression) afin de vérifier que le pilotage d'entrée correspond bien au pilotage de sortie de la simulation mécanique.

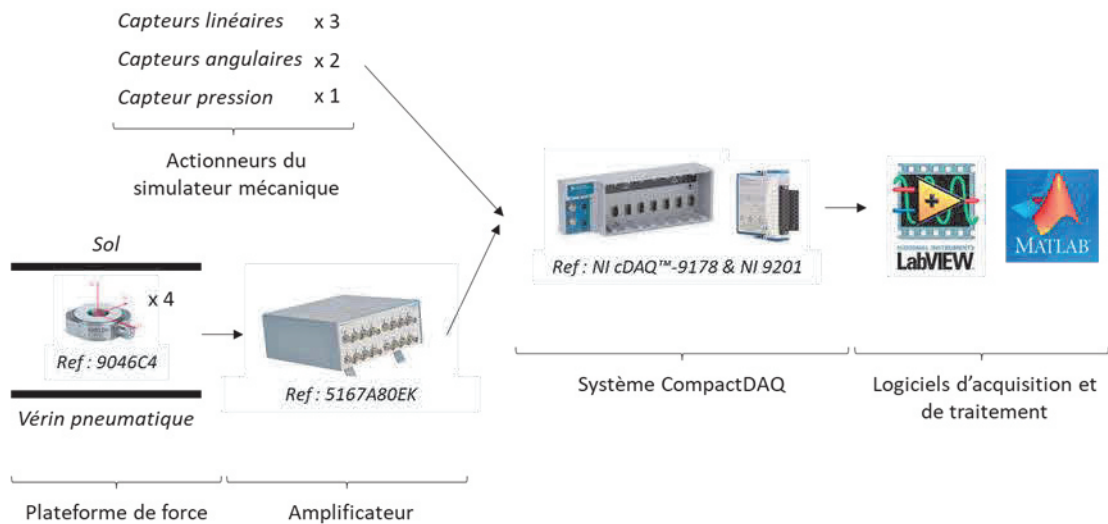


Figure 17 : Architecture de la chaîne d'acquisition de données de la plateforme de force.

3.2.3. Pilotage machine

3.2.3.1. Description

Un cycle machine est composé de 360 points de pilotage, correspondant à un tour de la manivelle. A chacun de ces points sont associées les valeurs souhaitées des 5 actionneurs :

- Le système bielle/manivelle (en °) correspondant au « déplacement du genou » (noté « Rotation de la manivelle (en °) » sur la [Figure 18](#)).
- Le pivot entre le chariot et une pièce intermédiaire avec l'inclinaison de la pièce intermédiaire par rapport à la direction verticale (en °) correspondant à l'angle de « flexion/extension du genou » (noté « Rotation de la liaison pivot (en °) » sur la [Figure 18](#)).
- Le système à crémaillère (en mm) correspondant au déplacement vertical du sol (noté « Déplacement de la crémaillère (en mm) » sur la [Figure 18](#)).
- Le système de rotation fixé sur le sol (en °) correspondant au mouvement de rotation du sol dans le plan frontal (noté « Rotation sol (en °) » sur la [Figure 18](#) mais qui ne sera pas utilisé au cours des tests réalisés pour l'écriture de ce manuscrit).
- Le vérin pneumatique avec la pression (en mbar) et l'état du distributeur de notre vérin pneumatique selon que la tige sort (« TRUE ») ou rentre (« FALSE ») de la chambre du vérin (noté respectivement « Pression vérin pneumatique (en mbar) » et « Etat du distributeur (TRUE/FALSE) » sur la [Figure 18](#)).

	A	B	C	D	E	F
1	Rotation de la manivelle (en °)	Rotation de la liaison pivot (en °)	Déplacement de la crémaillère (en mm)	Pression vérin pneumatique (en mbar)	Rotation sol (en °)	Etat distributeur (TRUE/FALSE)
2	0	-15.05	80.00	2000	0	TRUE
3	1	-15.07	81.11	2000	0	TRUE
4	2	-15.08	82.22	2000	0	TRUE
5	3	-15.09	83.33	2000	0	TRUE
...
160	158	37.88	172.22	2000	0	FALSE
161	159	38.07	171.11	2000	0	FALSE
162	160	38.26	170.00	2000	0	FALSE
163	161	38.44	168.89	2000	0	FALSE
164	162	38.61	167.78	2000	0	FALSE
165	163	38.77	166.67	2000	0	FALSE
...
358	356	-14.95	80.00	2000	0	TRUE
359	357	-14.98	80.00	2000	0	TRUE
360	358	-15.01	80.00	2000	0	TRUE
361	359	-15.03	80.00	2000	0	TRUE
362	360	-15.05	80.00	2000	0	TRUE

Figure 18 : Exemple de fichier de point de pilotage envoyé à l'IHM.

Ce cycle est donc décrit par un fichier de point (fichier au format .csv) (cf. Figure 18). Ce fichier est enregistré sur une clef USB qui est insérée dans le lecteur USB de l'interface homme-machine (IHM) du simulateur. La programmation de l'IHM (Magelis) et du contrôleur du simulateur (Modicon LMC 058) est réalisé à l'aide du logiciel SoMachine de Schneider Electric par le bureau d'étude Promeca Ingénierie.

3.2.3.2. Les phases de pilotage

Notre pilotage machine se découpe en deux grandes phases, qui sont similaires à l'activité de marche et de course à pied, à savoir :

- La phase de contact du pied avec le sol.
- La phase de vol du pied.

Du fait de la construction du simulateur mécanique de marche et de course à pied, la phase de contact du pied intervient lors de l'avancée du chariot, correspondant aux 180 premiers points de notre fichier de pilotage .csv avec pour position minimale de départ, le chariot de la machine à la position 0 cm et pour position maximale de fin, le chariot de la machine à la position de 50 cm (Figure 19). Cette phase peut ainsi comporter au maximum 180 points de pilotage mais elle peut aussi être raccourcie si besoin en

démarrant et finissant à une position différente mais comprise entre la position minimale et maximale du chariot de la machine.

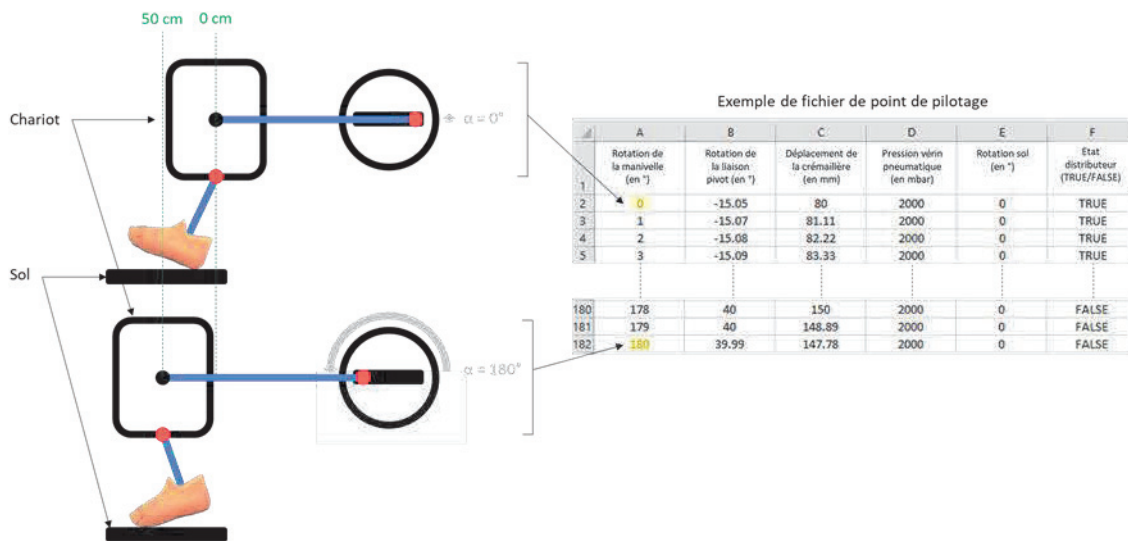


Figure 19 : Schéma de la partie haute du simulateur mécanique durant la phase de contact du pied avec le sol avec : en haut à gauche, le machine dans la position minimale de départ ; en bas à gauche, la machine dans la position maximale de fin ; à droite, un exemple de fichier de point de pilotage.

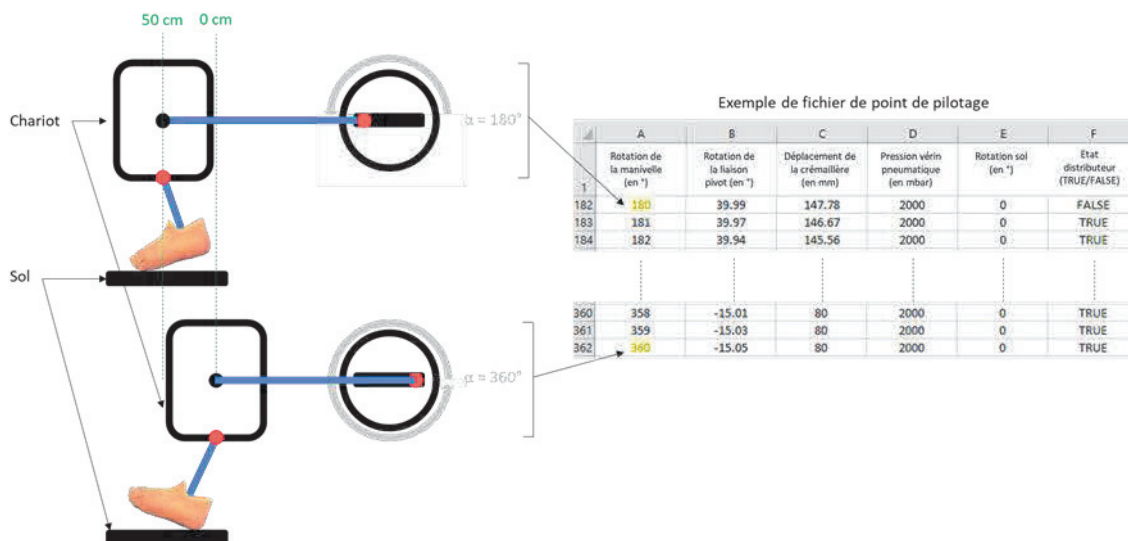


Figure 20 : Schéma de la partie haute du simulateur mécanique durant la phase de vol du pied avec le sol avec : en haut à gauche, le machine dans la position minimale de départ ; en bas à gauche, la machine dans la position maximale de fin ; à droite, un exemple de fichier de point de pilotage.

En ce qui concerne la phase de vol du pied, elle est pilotée par les 180 derniers points de notre fichier de pilotage .csv avec pour position minimale de départ, le chariot de la machine à la position 50 cm et pour position maximale de fin, le chariot de la machine à la position de 0 cm (Figure 20). Cette phase peut ainsi comporter au minimum 180 points de pilotage mais elle peut aussi être allongée si besoin en démarrant et finissant à une position différente mais comprise entre la position minimale et maximale du chariot de la machine.

Suivant la vitesse de tour machine sélectionnée (allant de 1 à 100 tour/minute) pour actionner le système de la bielle/manivelle, le temps maximal de la phase de contact est de 30 secondes à 1 tour/minute pour 180 points de pilotage et le temps minimal de la phase de contact est de 300 millisecondes à 100 tour/minute pour 180 points de pilotage. Si la phase de contact est pilotée à l'aide de moins de 180 points, les temps maximal et minimal seront diminués. Dans le cas où la phase contact du pied avec le sol est pilotée sur 180 points alors la phase de vol sera elle aussi pilotée sur 180 points (puisque le pilotage total d'un cycle de simulation est de 360 points) donc les deux phases auront le même temps de réalisation. Cependant, si la phase de contact est finalement pilotée sur moins de 180 points alors la phase de vol aura un temps de réalisation plus long que celui de la phase de contact du pied avec le sol.

3.2.4. Modèle cinématique de la machine

Cette partie s'intéresse principalement au premier système de déplacement du simulateur mécanique mais également au second système, au travers du pilotage de l'axe de la crémaillère. En effet, le premier système de déplacement fait bouger l'effecteur final dans le plan sagittal alors que le second système de déplacement gère la position verticale du sol et aussi les efforts transmis à l'effecteur final. Dans cette partie, seulement la gestion de la position verticale du sol sera traitée pour le second système de déplacement.

Comme nous avons pu le voir dans la section 3.1.2. Scoping review (Shoe wear test machine: what exists vs. innovations and promising concepts), l'utilisation directe des données de cinématiques articulaires issues des tests « au porté » ne permet pas de reproduire des interactions chaussure-sol cohérentes. Comme nous le verrons au Chapitre 5 : Génération de trajectoires de pilotage du simulateur mécanique, notre simulateur sera principalement piloté à partir des coordonnées cartésiennes du point d'attache de la prothèse par rapport au sol et de l'orientation de la pièce intermédiaire. Nous avons donc besoin d'un modèle géométrique du simulateur mécanique permettant de relier ces variables aux trois degrés de liberté pilotés de notre simulateur qui sont : la rotation de la bielle, la rotation du pivot et le déplacement vertical de la crémaillère pendant le cycle de marche.

3.2.4.1. Description

Les deux repères d'expression principaux sont le repère fixe de la machine (R_0) dont le centre est le point O puis le repère fixe par rapport au sol (R_s) dont le centre est le point S (Figure 21). Ces deux repères sont en translation l'un par rapport à l'autre autour de l'axe vertical de la crémaillère $Y_s = Y_0$.

Les différents points du modèle sont les suivants :

- O, point du centre de rotation du volant d'inertie.
- A, point d'accroche entre la manivelle et la bielle.
- B, point d'accroche entre la bielle et le chariot de translation du genou.
- C, point du centre de rotation de la pièce intermédiaire.
- D, point d'accroche entre la pièce intermédiaire et l'effecteur final.
- E et F, points de la chaussure avec respectivement le talon et les orteils.
- G, point bas du pilotage du système à crémaillère.
- Ligne sol, interface de contact entre le sol mobile et la semelle de la chaussure.
- S, point milieu de la ligne sol.
- Ligne crémaillère, position où s'arrête l'action de pilotage du système à crémaillère et commence l'action du vérin pneumatique.

Les paramétrages machines, contrôlés au cours du cycle de marche, sont les suivants :

- α (en degrés) pour le pilotage du système bielle-manivelle, centre au point O (entraînement des points A, B et C).
- β (en degrés) pour le pilotage de rotation de la pièce intermédiaire, centre au point C (entraînement des points D, E et F).
- y_{Cr} (en cm) : pilotage de la montée de la ligne sol, départ au point G (entraînement du point « Ligne crémaillère » et de manière secondaire du point « Ligne sol »).
- P (en mbar) : pilotage de la montée de la ligne sol, départ au point « Ligne crémaillère » (entraînement du point « Ligne sol »).

Les paramétrages fixes durant la simulation mécanique sont les suivants :

- L (en cm, réglable), longueur de l'accroche entre la manivelle et la bielle par rapport au point O.
- c_b (en cm, valeur fixe) : longueur de la bielle entre le point A et B.
- c_g (en cm, valeur fixe) : distance entre le point B et C.
- l (en cm, réglable) : longueur de la pièce intermédiaire entre le point C et D.
- θ (en degrés, réglable) : orientation de l'effecteur final dans la plan sagittal.

- x_E, y_E, x_F et y_F (en cm, réglable) : position des points sur la chaussure par rapport au point D.
- H (en cm, valeur fixe) : distance suivant l'axe y entre le point O et le point G.
- x_{Cr} (en mm, valeur fixe) : distance suivant l'axe x entre le point O et le point G.

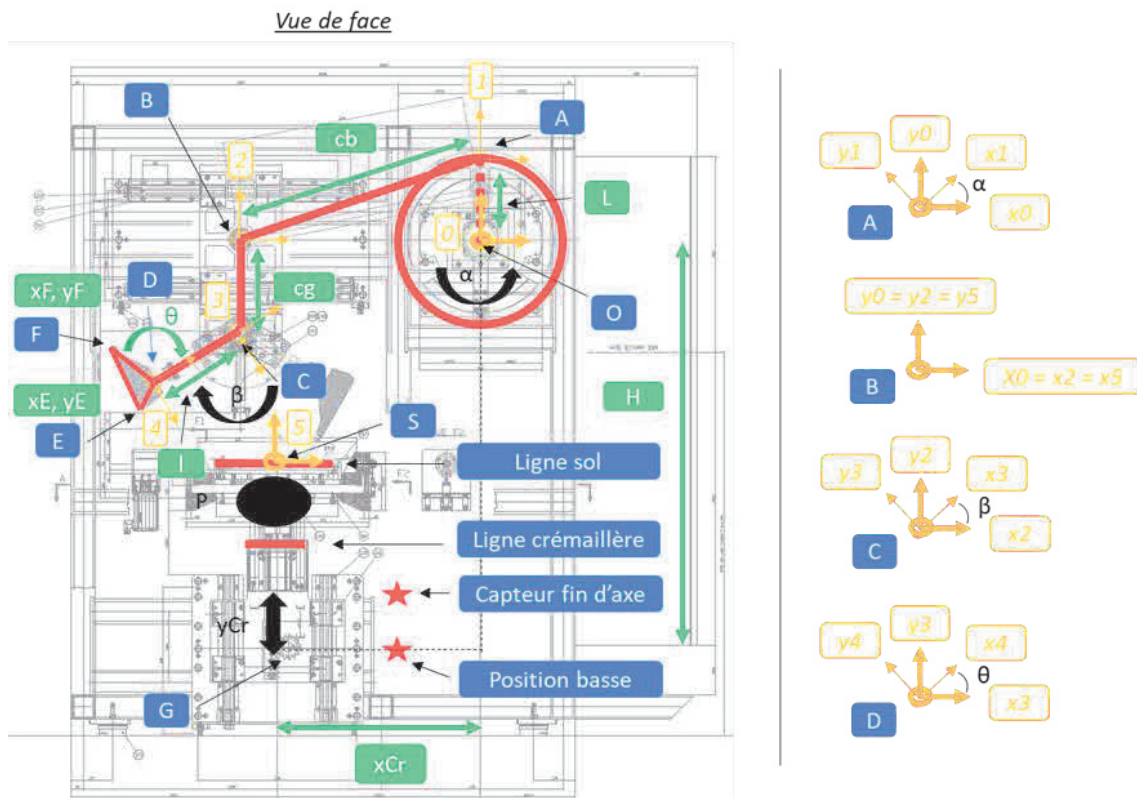


Figure 21 : Schéma de la représentation du modèle géométrique.

3.2.4.2. Equation

Pour pouvoir piloter un point du pied (dans notre cas le talon, point E) dans le plan sagittal du simulateur mécanique, les équations sont les suivantes :

- Vecteur \vec{OB}

$$\vec{OB} = \begin{pmatrix} L \cos \alpha - \sqrt{cb^2 - (L \sin \alpha)^2} \\ 0 \end{pmatrix}_O \tag{1}$$

- Vecteur \vec{BC}

$$\overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} 0 \\ -cg \end{pmatrix}_O \quad (2)$$

- Vecteur \overrightarrow{CD}

$$\overrightarrow{CD} = \begin{pmatrix} l \sin \beta \\ -l \cos \beta \end{pmatrix}_O \quad (3)$$

- Vecteur \overrightarrow{DE}

$$\overrightarrow{DE} = \begin{pmatrix} x_{ED} \cos(\theta+\beta) - y_{ED} \sin(\theta+\beta) \\ x_{ED} \sin(\theta+\beta) + y_{ED} \cos(\theta+\beta) \end{pmatrix}_O \quad (4)$$

- Comme on connaît les vecteurs \overrightarrow{OB} , \overrightarrow{BC} , \overrightarrow{CD} , \overrightarrow{DE} , on obtient le vecteur \overrightarrow{OE}

$$\overrightarrow{OE} = \overrightarrow{OB} + \overrightarrow{BC} + \overrightarrow{CD} + \overrightarrow{DE} \quad (1) + (2) + (3) + (4) \rightarrow (5)$$

$$\overrightarrow{OE} = \begin{pmatrix} L \cos \alpha - \sqrt{cb^2 - (L \sin \alpha)^2} + l \sin \beta + x_{ED} \cos(\theta+\beta) - y_{ED} \sin(\theta+\beta) \\ -cg - l \cos \beta + x_{ED} \sin(\theta+\beta) + y_{ED} \cos(\theta+\beta) \end{pmatrix}_O \quad (5)$$

- Vecteur \overrightarrow{OS}

$$\overrightarrow{OS} = \begin{pmatrix} -x_{Cr} \\ -H + y_{Cr} \end{pmatrix}_O \quad (6)$$

- A l'aide du vecteur \overrightarrow{OE} , on obtient le vecteur \overrightarrow{SE}

$$\overrightarrow{OE} = \overrightarrow{OS} + \overrightarrow{SE} \quad (7)$$

$$\overrightarrow{SE} = \overrightarrow{OE} - \overrightarrow{OS} \quad (5) - (6) \rightarrow (8)$$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{SE} &= \begin{pmatrix} L \cos \alpha - \sqrt{cb^2 - (L \sin \alpha)^2} + l \sin \beta + x_{ED} \cos(\theta+\beta) - y_{ED} \sin(\theta+\beta) + x_{Cr} \\ -cg - l \cos \beta + x_{ED} \sin(\theta+\beta) + y_{ED} \cos(\theta+\beta) + H - y_{Cr} \end{pmatrix}_O \quad (8) \end{aligned}$$

On trouve ainsi les coordonnées du point E dans le repère (S, x_S, y_S) :

$$x_{E_S} = L \cos \alpha - \sqrt{cb^2 - (L \sin \alpha)^2} + l \sin \beta + x_{ED} \cos(\theta+\beta) - y_{ED} \sin(\theta+\beta) + x_{Cr} \quad (9)$$

$$y_{E_S} = -cg - l \cos \beta + x_{ED} \sin(\theta+\beta) + y_{ED} \cos(\theta+\beta) + H - y_{Cr} \quad (10)$$

On peut ainsi exprimer la vitesse du point E dans le repère (S, x_S, y_S) :

$$\begin{aligned} \dot{x}_{E_S} = & -\dot{\alpha}L \sin \alpha - \frac{-\dot{\alpha}L \cos \alpha \sin \alpha}{\sqrt{cb^2 - (L \sin \alpha)^2}} + \dot{\beta}l \cos \beta - x_{E_D} \dot{\beta} \sin (\theta+\beta) \\ & - y_{E_D} \dot{\beta} \cos (\theta+\beta) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\dot{y}_{E_S} = \dot{\beta}l \sin \beta + x_{E_4} \dot{\beta} \cos (\beta+\theta) - y_{E_4} \dot{\beta} \sin (\beta+\theta) - \dot{y}_{Cr} \quad (12)$$

Pour déterminer l'angle du pied avec le sol, on trouve :

$$\text{angle pied/sol} = \text{angle}(\vec{x}_4, \vec{x}_0) = \beta + \theta \quad (13)$$

3.2.4.3. Utilisation des données biomécaniques

Afin de pouvoir utiliser les données cinématiques de position de nos différents points d'intérêt acquis lors des tests « au porté » pour ensuite imaginer piloter le simulateur mécanique, il nous faut en premier lieu réaliser un changement de repère qui permet de passer de données exprimées dans le repère du tapis roulant à un repère machine ([Figure 22](#)). Pour cela, il nous faut d'abord prendre en compte la vitesse de déplacement horizontale ([Figure 23. B](#) & [Figure 24. B](#)) du tapis avec comme première matrice de transfert :

$$T_{Tapis}^{Fixe} = \begin{bmatrix} R_{Tapis}^{Machine} & (O_{Fixe}O_{Tapis})_{Tapis} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

avec :

$$\otimes R_{Tapis}^{Machine} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\otimes (O_{Fixe}O_{Tapis})_{Tapis} = \begin{bmatrix} -V_{tapis} * t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Puis il nous faut prendre en compte le déplacement vertical du genou ([Figure 23. C](#) & [Figure 24. C](#)) durant le cycle de marche avec comme seconde matrice de transfert :

$$T_{Tapis}^{Fixe} = \begin{bmatrix} R_{Tapis}^{Machine} & (O_{Fixe}O_{Genou})_{Tapis} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

avec $(O_{Fixe}O_{Genou})_{Tapis}$ qui représente le déplacement vertical du genou dans le repère :

$$\otimes (O_{Fixe}O_{Genou})_{Tapis} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\text{oscillation verticale genou} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Enfin il nous faut prendre en compte la position initiale du genou et celle du repère du sol dans le repère de la machine ([Figure 25](#)) avec comme troisième matrice de transfert :

$$T_{Tapis}^{Machine} = \begin{bmatrix} R_{Tapis}^{Machine} & (O_{Machine}O_{Tapis})_{Tapis} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

avec :

$$\boxtimes (O_{Machine}O_{Tapis})_{Tapis} = \begin{bmatrix} -x_{\vec{OC}Initiale} - x_{Cr} \\ -y_{\vec{OC}Initiale} - H \\ 0 \end{bmatrix}$$

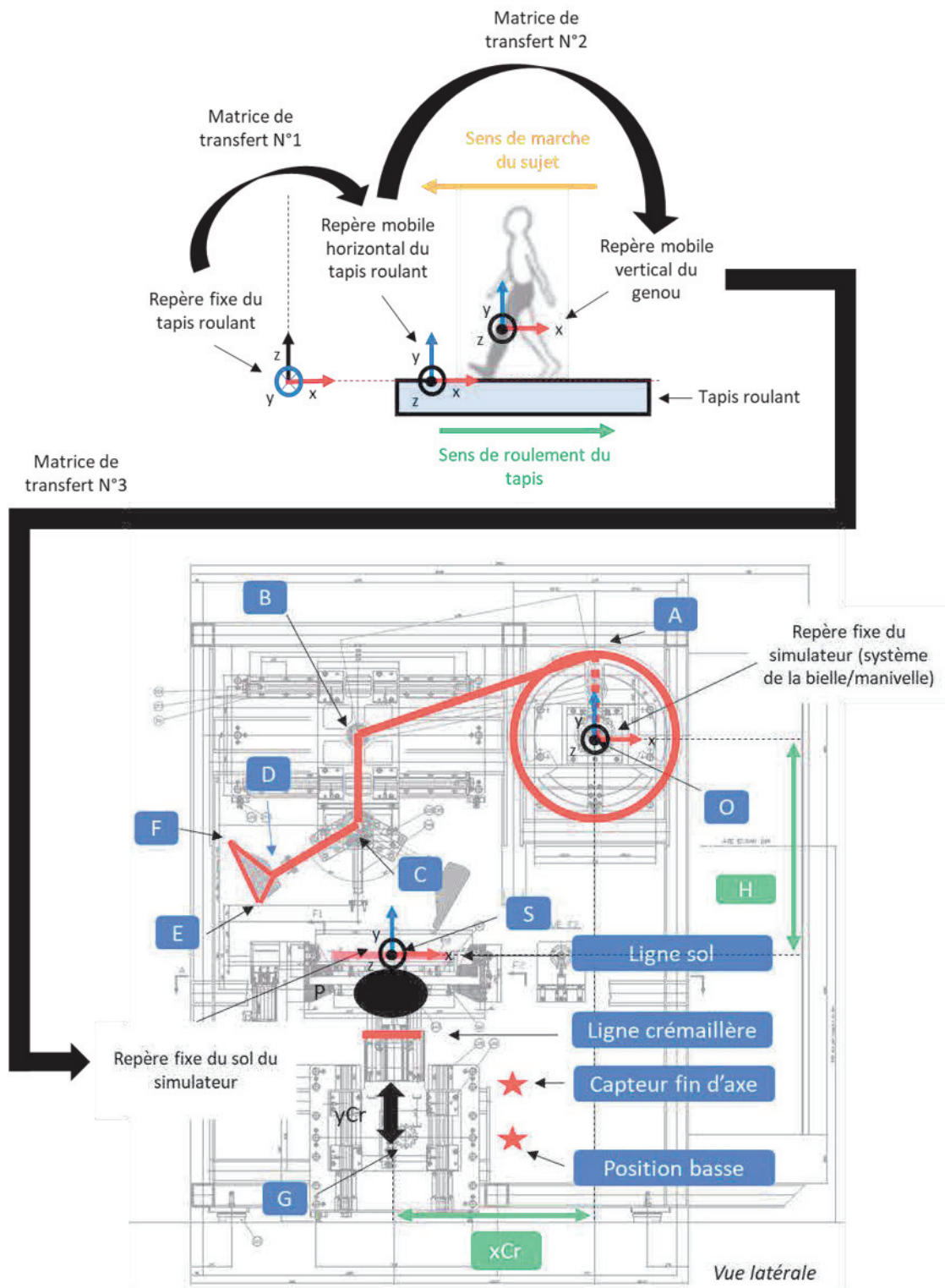


Figure 22 : Schéma représentant l'ordre d'utilisation des matrices de transfert permettant de passer de données issues du repère du tapis roulant à un repère machine.

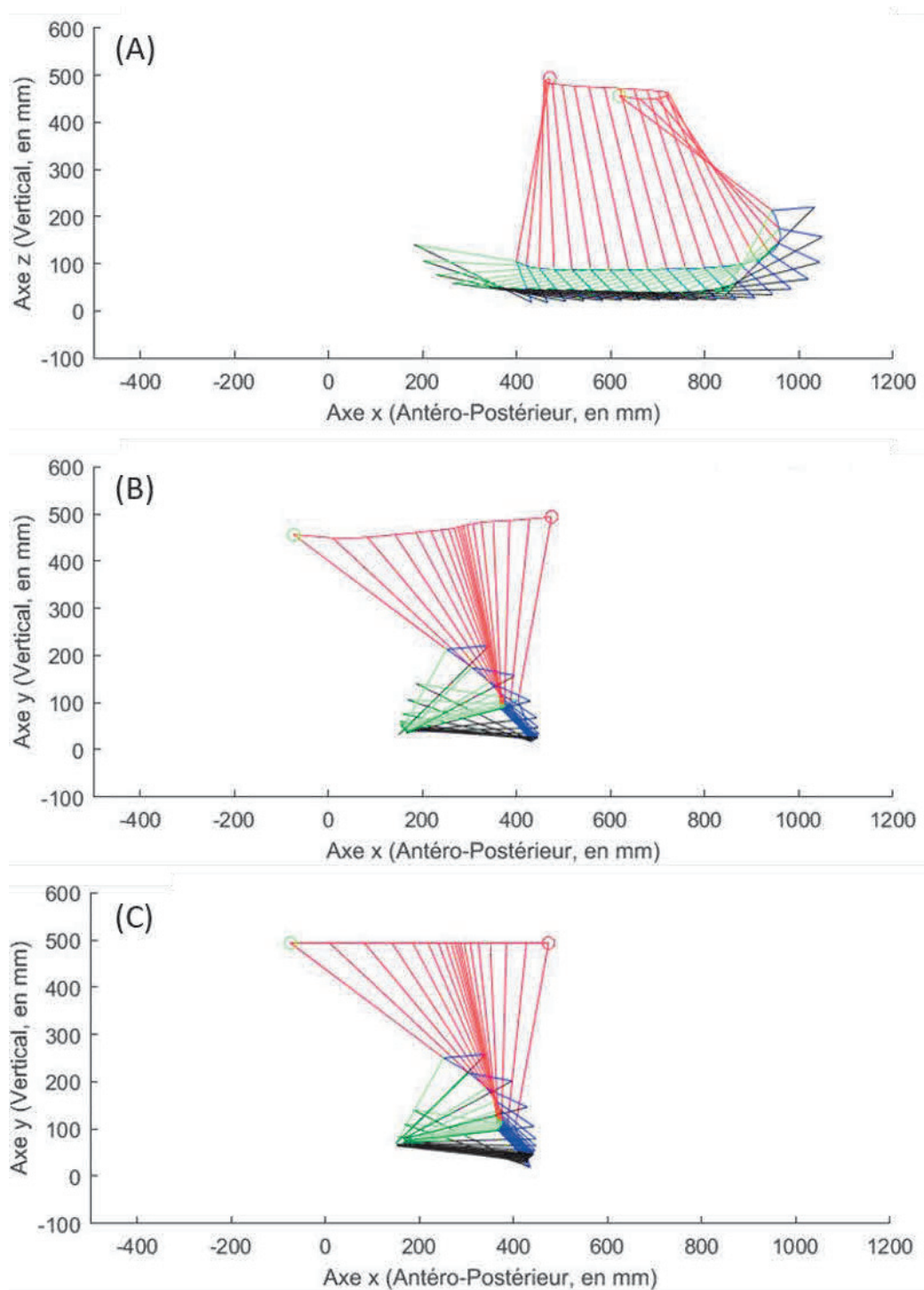


Figure 23 : Exemple de cinématique d'un pas durant la phase de contact du pied avec le sol pour la marche à 3 km/h observée lors des expérimentations « au porté » : (A) dans le repère laboratoire, (B) dans le repère tapis (C) dans le repère machine.

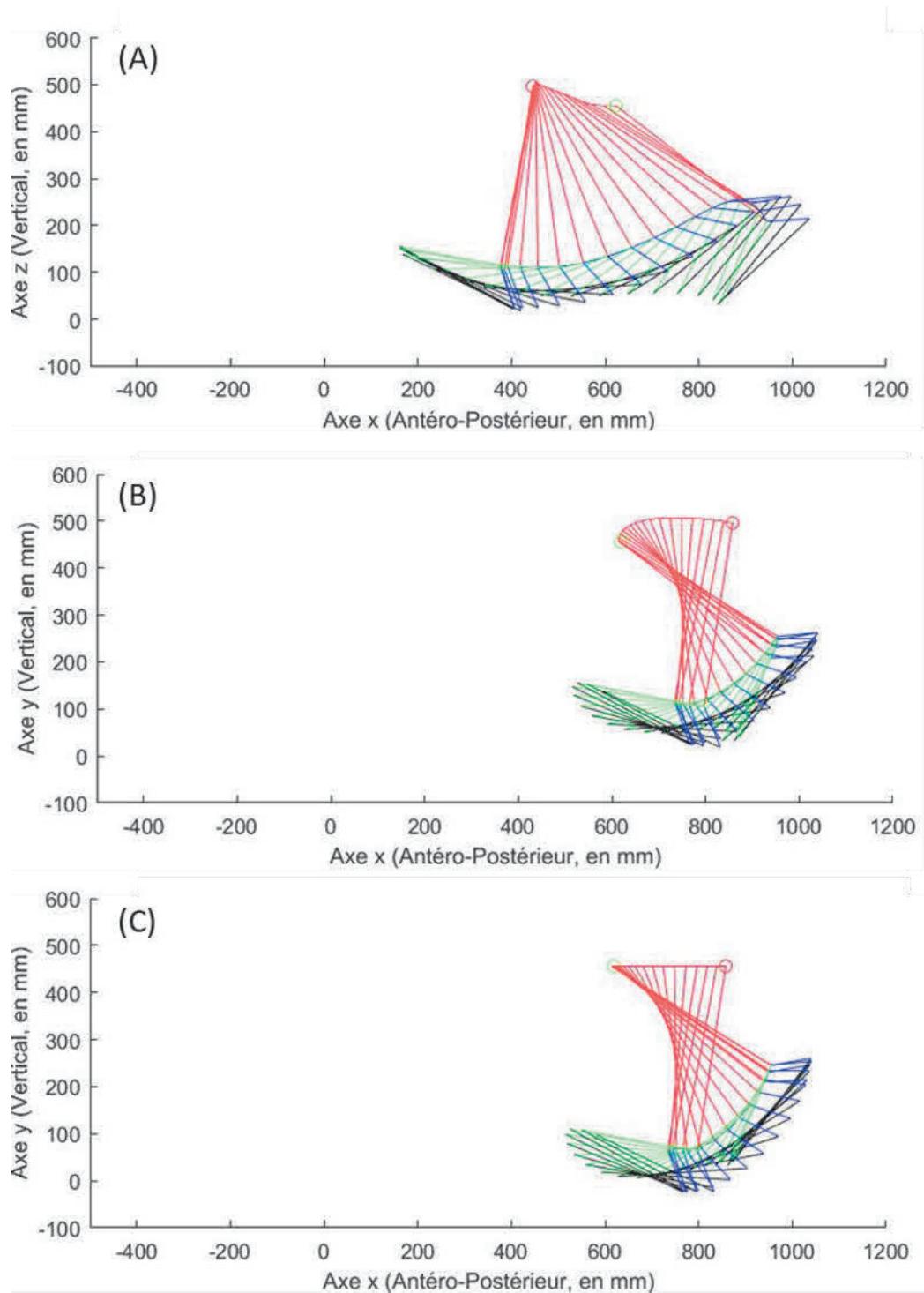


Figure 24 : Exemple de cinématique d'un pas durant la phase de vol du pied avec le sol pour la marche à 3 km/h observée lors des expérimentations « au porté » : (A) dans le repère laboratoire, (B) dans le repère tapis (C) dans le repère machine.

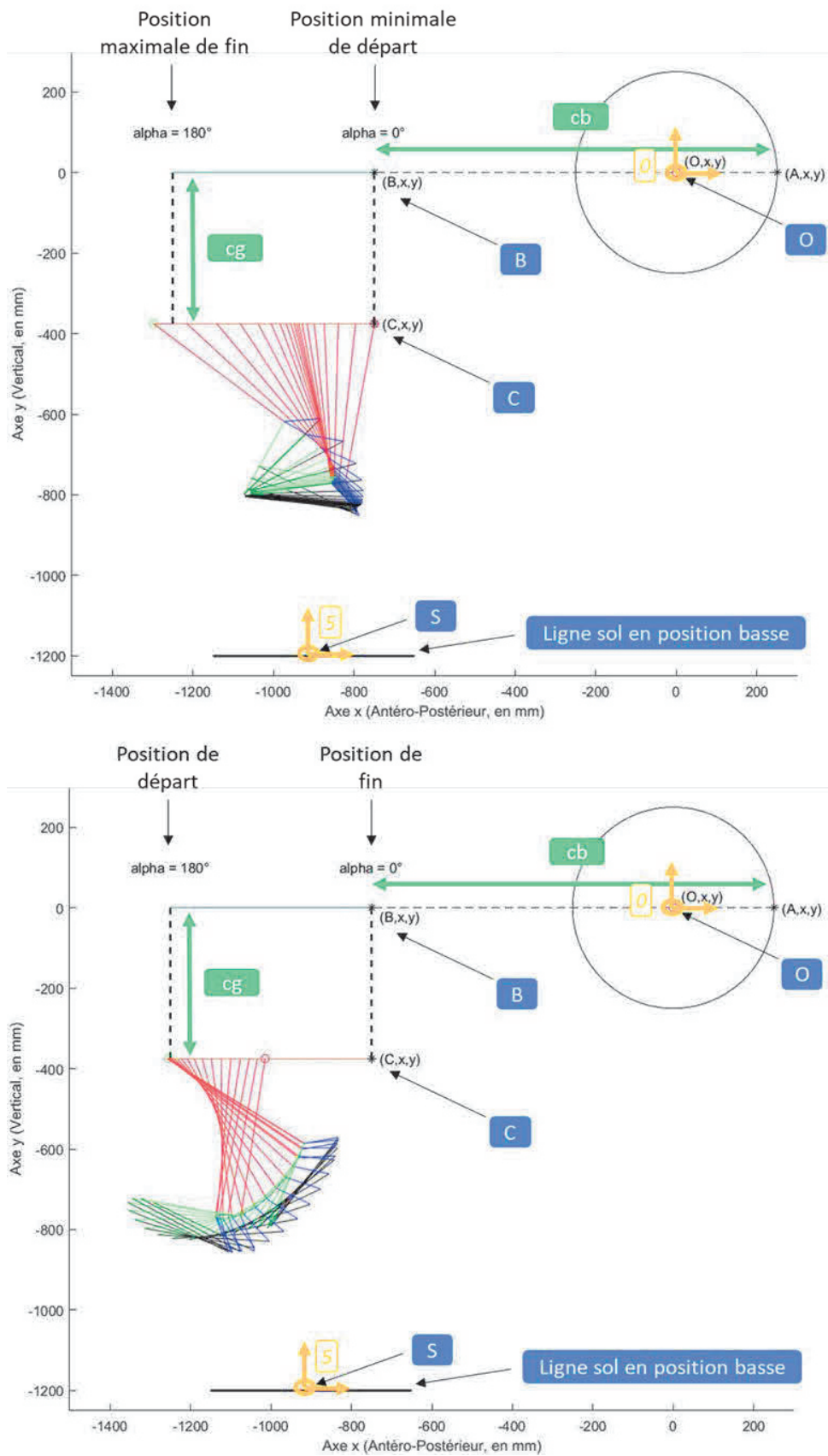


Figure 25 : Exemple de résultats de la transformation des données issues des tests « au porté » dans le repère du simulateur mécanique de marche et de course à pied pour la phase de contact du pied avec le sol (figure du haut) et pour la phase de vol du pied (figure du bas).

3.2.5. Caractérisation des éléments compliant

L'un des éléments-clés de ce simulateur mécanique est la présence d'éléments compliant : le complexe pied prothétique + chaussure ainsi que le vérin pneumatique et son régulateur. L'objectif de cette partie est de caractériser ces éléments afin de pouvoir établir des relations entre la déformation globale de cet ensemble compliant (position et vitesse verticales relatives entre le point d'attache du pied prothétique et la crémaillère), certaines de ses caractéristiques (orientation du pied prothétique, réglage du régulateur du vérin) et les efforts verticaux résultants. Ces relations nous serviront ensuite à établir des trajectoires de pilotage du simulateur en ayant comme objectif l'obtention d'efforts verticaux réalistes (cf. Chapitre 5 : Génération de trajectoires de pilotage du simulateur mécanique).

3.2.5.1. Description

Afin de caractériser la compliance de notre système, nous avons réalisé une série de tests simples en faisant varier à la fois :

- ❖ La vitesse de montée du système de la crémaillère (ce qui correspond également à la vitesse d'enfoncement de la tige du vérin pneumatique dans sa chambre).
- ❖ La pression du vérin pneumatique (la pression est théoriquement constante lors des tests, néanmoins il est possible qu'elle varie à cause du temps de réaction du régulateur pneumatique).
- ❖ L'amplitude maximale d'enfoncement de la tige du vérin pneumatique dans sa chambre.
- ❖ L'effecteur final (forme rigide en bois sans chaussure ou prothèse avec chaussure dans différentes orientations).

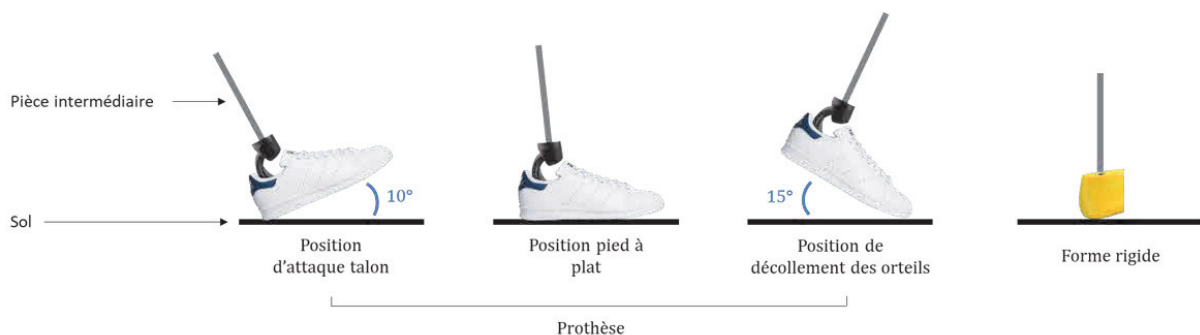


Figure 26 : Illustration des quatre positions d'orientation de l'effecteur final (prothèse + chaussure ou forme rigide) par rapport au sol.

Lors des tests avec prothèse, nous avons fait le choix de choisir des positions clés d'orientation du pied par rapport au sol (Figure 26), d'après les données des tests « au porté », qui sont :

- ✘ Pied en position d'attaque talon par rapport au sol (angle d'attaque de -10°).
- ✘ Pied en position à plat par rapport au sol.
- ✘ Pied en position de décolllement des orteils par rapport au sol (angle de décollage de 15°).

Pour chacun de ces tests, la prothèse + chaussure comme la forme rigide sont déjà en contact avec le sol. Pour cela, nous ajustons la longueur de la pièce intermédiaire sur laquelle est fixé l'effecteur final afin que : pour la position d'attaque talon, le talon soit en contact avec le sol, pour la position pied à plat, la semelle de la chaussure (du talon à l'articulation métatarso-phalangienne) soit en contact avec le sol et pour la position de décolllement des orteils, le bout du pied soit en contact avec le sol. Pour les tests avec la forme rigide, nous n'avons qu'une seule position dans laquelle la pièce intermédiaire est orientée verticalement par rapport au sol et placée en contact (Figure 26).

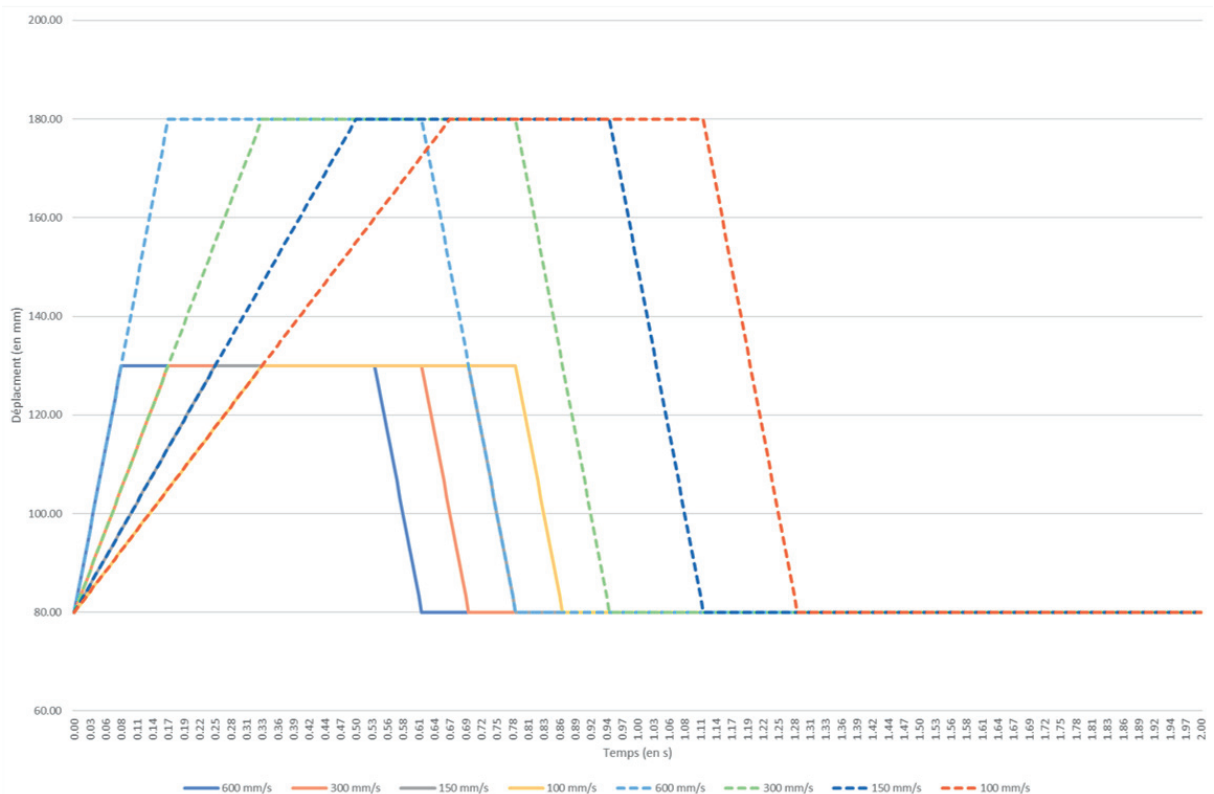


Figure 27 : Données de pilotage du système de la crémaillère pour les 4 vitesses de montée et les 2 niveaux d'enfoncement (en trait plein, le niveau d'enfoncement de 50 mm et en trait pointillé, le niveau d'enfoncement de 100 mm).

Nous avons utilisé 4 vitesses différentes pour la montée du système de la crémaillère qui sont les suivantes : 150, 200, 300, 600 mm/s avec deux niveaux d'enfoncement allant de 50 à 100 mm ([Figure 27](#)) et 3 niveaux de pression du vérin pneumatique qui sont les suivants : 2000, 3000 et 4000 mbar. Le pilotage du système de la crémaillère se constitue d'une montée suivant une des 4 vitesses imposées suivit d'un plateau où le sol reste fixe à une position donnée pendant 80° machines (soit 0,44 seconde) et enfin une descente du système dont la vitesse est fixe pour chacun des tests (600 mm/s) afin de revenir à la position initiale de départ lorsque la tige du vérin pneumatique est complètement sortie de sa chambre. Un total de 50 cycles étaient réalisés dans chaque configuration. Nous avons donc testé un total de 96 configurations afin d'obtenir une meilleure compréhension de la compliance du système composé de l'effecteur final et du sol mobile.

Les données analysées sont le pic de la force verticale atteint durant la montée du système de la crémaillère (F_{max}) et la valeur moyenne de la force verticale durant la phase où le sol reste fixe verticalement (F_{moyen}) ([Figure 28](#) & [Figure 29](#)).

Des modèles linéaires (un par orientation de chaussure et un pour la forme rigide) permettent ensuite d'exprimer les relations entre chacune de ces deux variables et les caractéristiques de l'essai (enfoncement, vitesse d'enfoncement et pression dans le vérin, sans considérer les interactions).

3.2.5.2. Résultats

La [Figure 28](#) et la [Figure 29](#) sont des exemples de résultats des courbes de la force verticale en fonction du temps. Nous pouvons voir qu'il y a un pic d'effort lors de la montée (F_{max}), avec des oscillations dues au régulateur du système pneumatique, puis un plateau (F_{moyen}).

Les résultats pour les essais avec comme effecteur final la prothèse + chaussure sont présentés dans la [Figure 30](#) pour les données du pic de la force verticale atteint durant la montée du système de la crémaillère et dans la [Figure 31](#) pour les données de la valeur moyenne de la force verticale durant la phase où le sol reste fixe verticalement avec les données des deux enfoncements moyennés. Les résultats pour les essais avec comme effecteur final la forme rigide sont présentés dans la [Figure 32](#) avec les données des deux enfoncements moyennés.

Quelle que soit l'orientation du pied par rapport au sol, l'effecteur final, la vitesse de montée du système de la crémaillère et la pression du vérin pneumatique, nous ne trouvons aucun effet du niveau de l'amplitude maximale d'enfoncement de la tige du vérin pneumatique dans la chambre du vérin pneumatique (50 et 100 mm).

Les résultats des modèles linéaires sont présentés dans le [Tableau 12](#) pour les données du pic de la force verticale atteint durant la montée du système de la crémaillère et [Tableau 13](#) pour les données de la valeur moyenne de la force verticale durant la phase où le sol reste fixe verticalement.

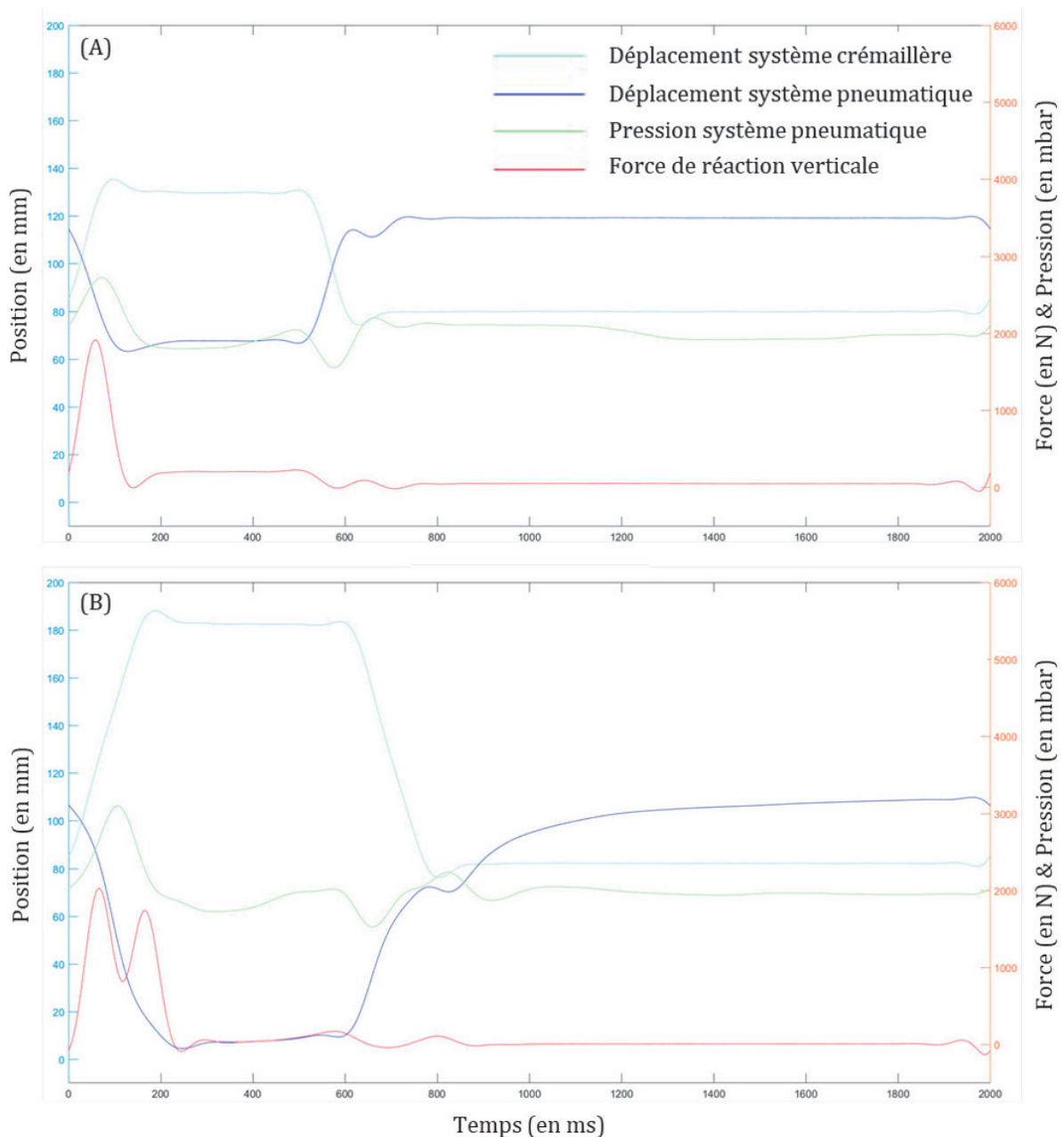


Figure 28 : Exemple de résultats des courbes de la force verticale en fonction du temps (en rouge) avec les données : de déplacement du système crémaillère (en bleu), de déplacement du système pneumatique (en violet) et de régulation de la pression du système pneumatique (en vert) pour (A), la condition avec position d'orientation en attaque talon de la prothèse + chaussure avec une pression de 2000 mbar, un enfoncement de 50 mm et une vitesse de montée de 600 m/s et pour (B), les mêmes réglages mais avec cette fois un enfoncement de 100 mm.

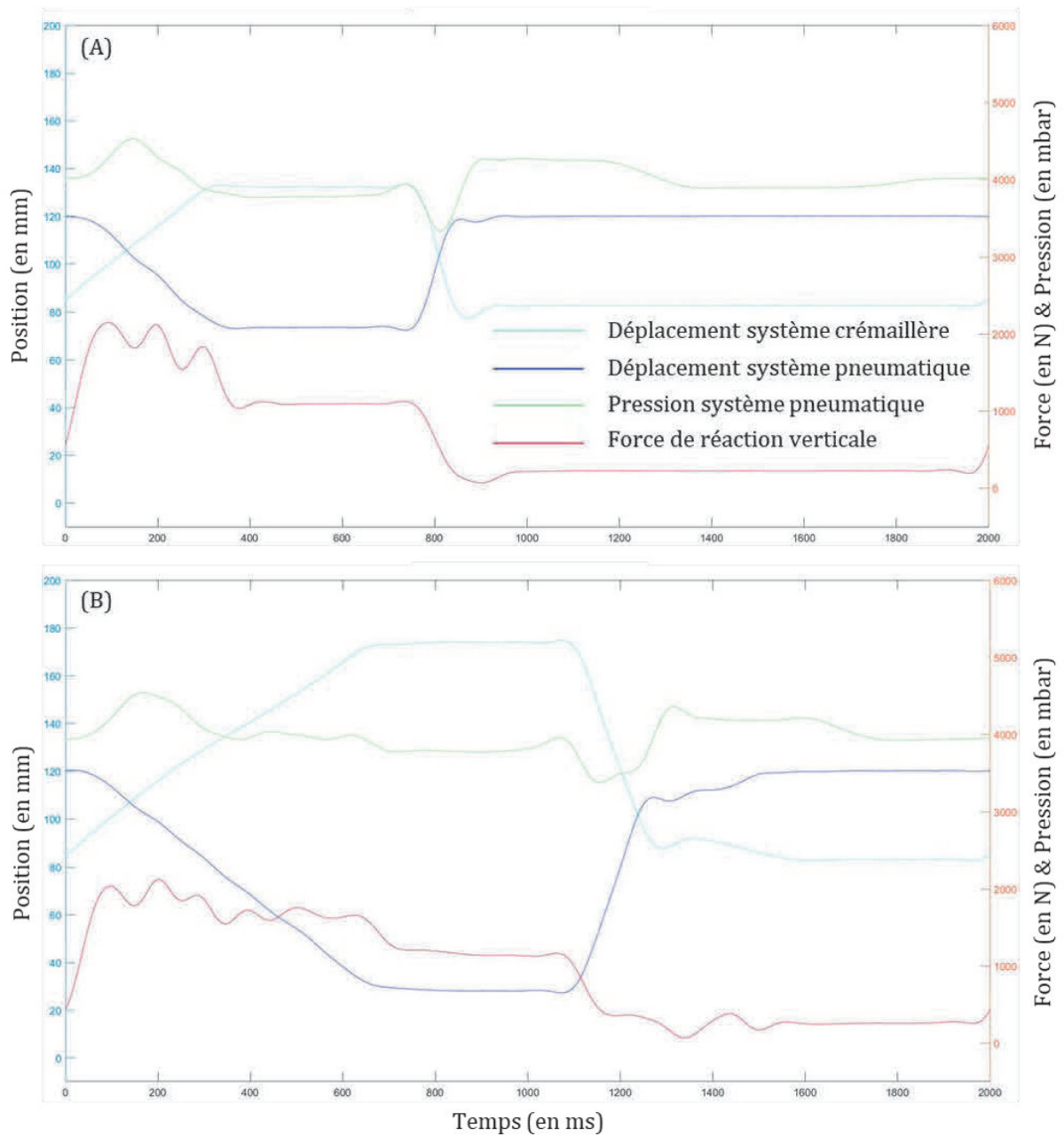


Figure 29 : Exemple de résultats des courbes de la force verticale en fonction du temps (en rouge) avec les données : de déplacement du système crémaillère (en bleu), de déplacement du système pneumatique (en violet) et de régulation de la pression du système pneumatique (en vert) pour (A), la condition avec position d'orientation en attaque talon de la prothèse + chaussure avec une pression de 4000 mbar, un enfoncement de 50 mm et une vitesse de montée de 200 m/s et pour (B), les mêmes réglages mais avec cette fois un enfoncement de 100 mm.

On observe tout d'abord que l'enfoncement n'est jamais une variable significative. En d'autres termes, les efforts verticaux entre l'effecteur final et le sol ne dépendent pas de l'enfoncement. Cela semble cohérent du fait du régulateur (cf. 3.2.2. Spécifications machine). On peut aussi constater que les modèles linéaires obtenus en ne conservant que la pression et la vitesse d'enfoncement permettent de rendre compte des efforts de manière très correcte : ces modèles sont tous significatifs et présentent des coefficients de détermination (R^2) importants : $R^2 > 0,93$ sauf pour la condition prothèse + chaussure en position "décollement des orteils", où une très forte variabilité sur l'essai à faible vitesse et à 2 bars dégrade ces coefficients de détermination (R^2 entre 0,69 et 0,86).

On observe un effet de la pression du vérin pneumatique ($p < 0.001$) quel que soit l'orientation du pied par rapport au sol et l'effecteur final aussi bien pour les données du pic de la force verticale atteint durant la montée du système de la crémaillère que pour les données de la valeur moyenne de la force verticale durant la phase où le sol reste fixe verticalement : sans surprise, plus la pression est importante, plus l'effort vertical résultant est important.

Globalement, la vitesse de montée du système de la crémaillère a un effet important sur le pic d'effort vertical (plus la vitesse est importante plus le pic d'effort est important). Cet effet peut s'expliquer du fait du délai de régulation du régulateur : le régulateur met quelques millisecondes à adapter la pression dans le vérin. Lorsque l'enfoncement augmente, la pression dans le vérin augmente au cours de ce délai, entraînant une augmentation de la force résultante. Cet effet est particulièrement visible sur les courbes de la [Figure 28](#) et de la [Figure 29](#). Lorsque la vitesse augmente, l'enfoncement au cours de ce délai de régulation est plus important, tout comme l'effort résultant de cet effet.

Cet effet subsiste dans certaines conditions pour la valeur moyenne de la force verticale :

- ❏ Prothèse + chaussure en position de décollement des orteils pour les données du pic de la force verticale atteint durant la montée du système de la crémaillère ($F(1, 12) = 3.413, p = 0,089$) ([Figure 30. C](#)).
- ❏ Forme rigide pour les données de la valeur moyenne de la force verticale durant la phase où le sol reste fixe verticalement ($F(1, 10) = 3.855, p = 0,078$) ([Figure 32. B](#)).

Enfin, on peut confirmer que le pied prothétique a une réelle influence sur la compliance du notre système : globalement, les efforts obtenus avec le pied prothétique sont supérieurs aux efforts obtenus avec la forme rigide en bois. De même, l'orientation du pied prothétique modifie la compliance de l'ensemble, comme cela peut se voir sur les figures et sur les coefficients des différents modèles linéaires.

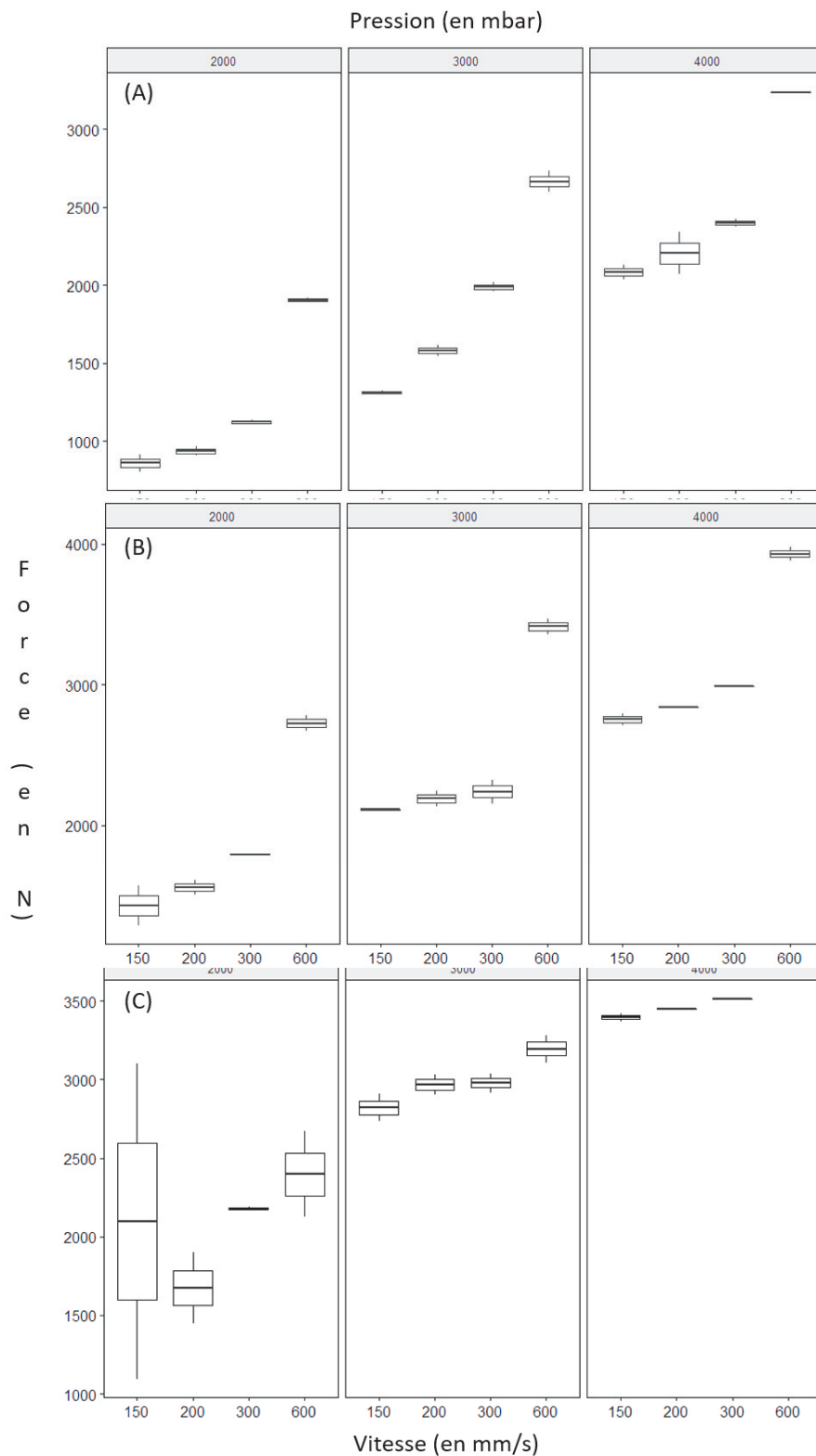


Figure 30 : Résultats des données du pic de la force verticale atteint durant la montée du système de la crémaillère avec la prothèse comme effecteur final pour (A), l'orientation du pied en position d'attaque talon pour (B), l'orientation du pied en position à plat et pour (C), l'orientation du pied en position de décollement des orteils.

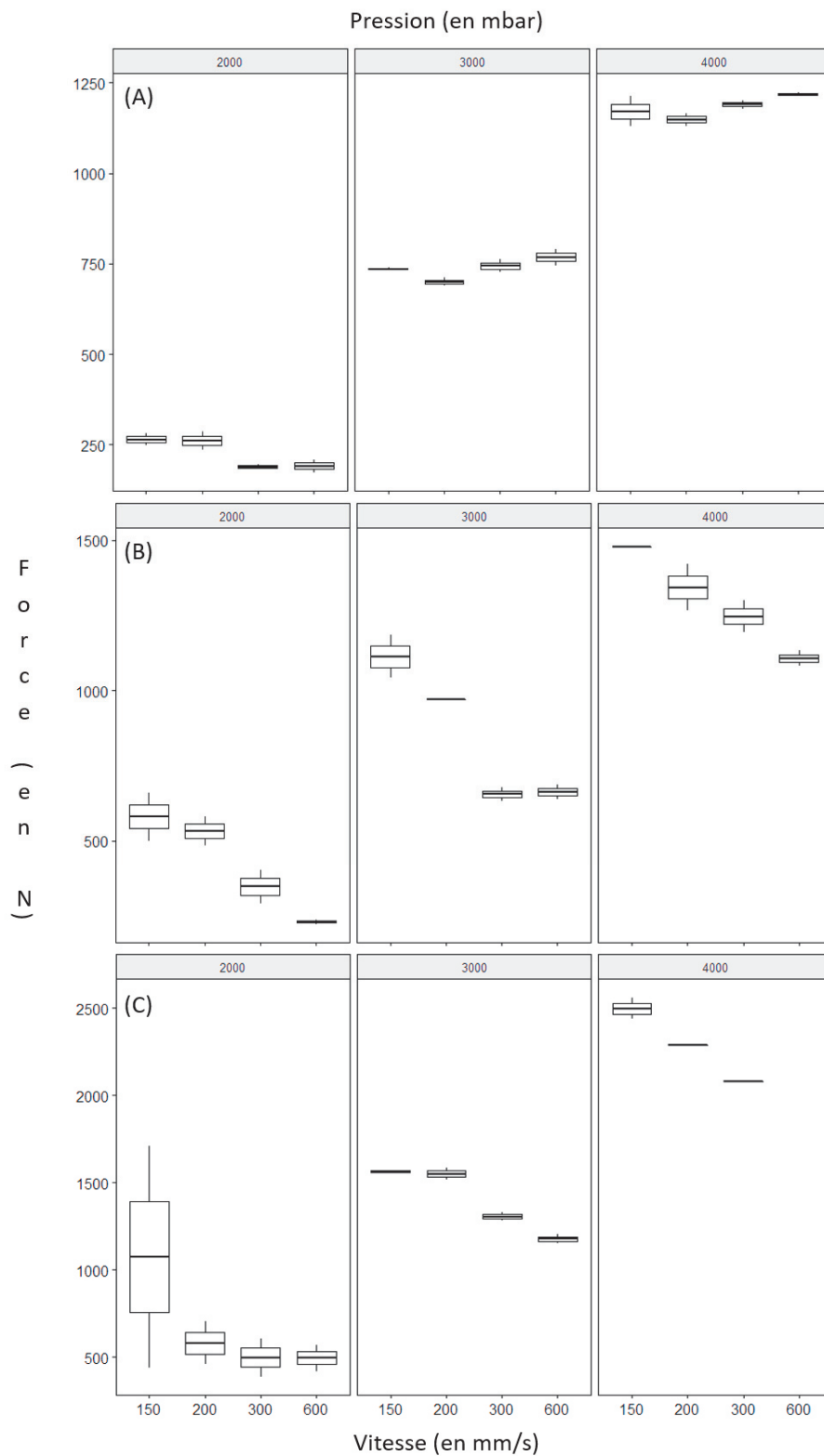


Figure 31 : Résultats des données de la valeur moyenne de la force verticale durant la phase ou le sol reste fixe verticalement avec la prothèse comme effecteur final pour (A), l'orientation du pied en position d'attaque talon pour (B), l'orientation du pied en position à plat et pour (C), l'orientation du pied en position de décollement des orteils.

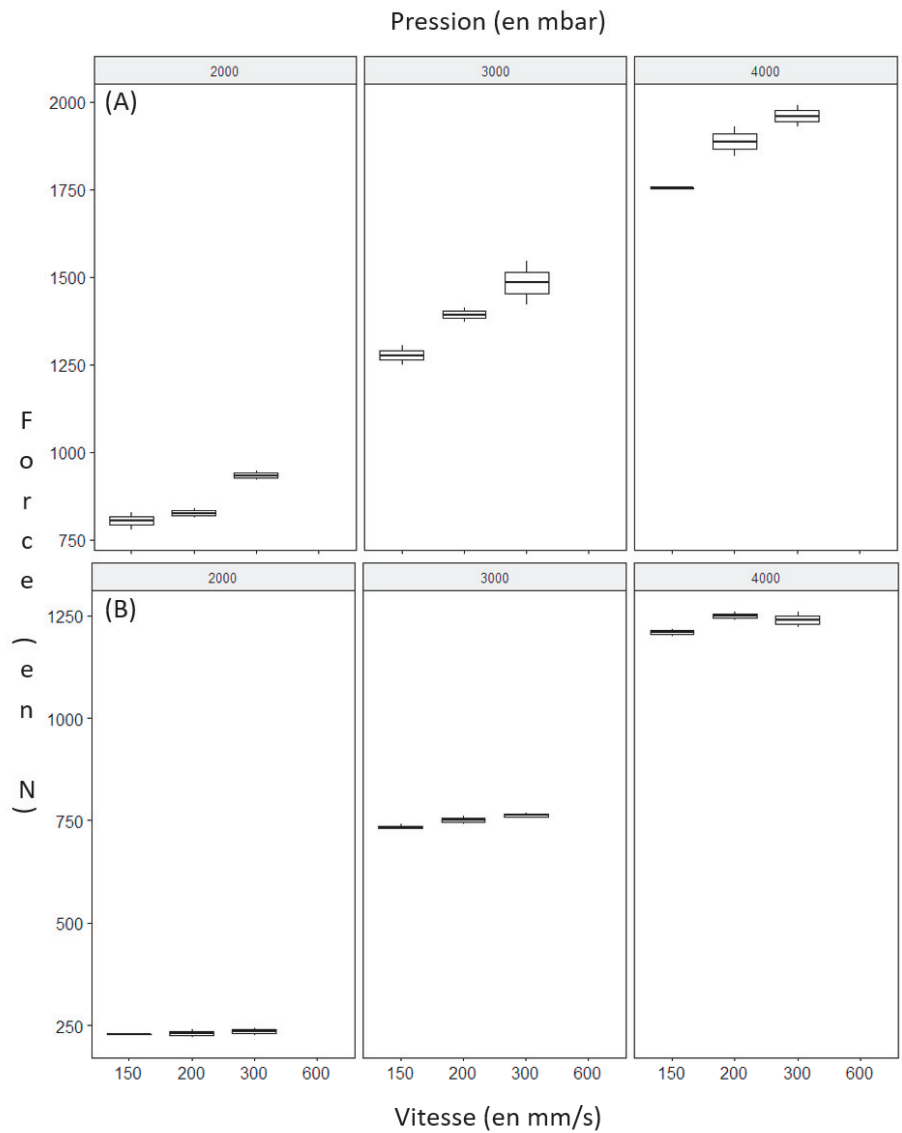


Figure 32 : Résultats des données pour (A), des données du pic de la force verticale atteint durant la montée du système de la crémaillère et pour (B), des données de la valeur moyenne de la force verticale durant la phase où le sol reste fixe verticalement avec la forme rigide comme effecteur final.

Tableau 12 : Coefficients des modèles linéaires pour la donnée du pic de la force verticale atteint durant la montée du système de la crémaillère avec $p < 0.001^{***}$, $p < 0.01^{**}$ et $p < 0.05^*$.

			Coefficients					
Effecteur	Orientation	Modèle linéaire multiple	Constante	Variable 1: Enfoncement	Variable 2 : Pression	Variable 3 : Vitesse	Multiple R ²	Adjusted R ²
Prothèse	Attaque Talon	3 variables	-929.201***	0.755	0.638***	2.605***	0.9847	0.9824
		2 variables	-872.576***	-	0.638***	2.605***	0.9840	0.9825
	Attaque Milieu	3 variables	-291.084*	0.136	0.627***	2.858***	0.9792	0.9761
		2 variables	-280.834**	-	0.627***	2.858***	0.9792	0.9772
	Attaque Avant	3 variables	46.092	3.000	0.772***	1.002	0.7041	0.6486
		2 variables	310.808	-	0.756***	0.996	0.6919	0.6556
Forme Rigide	Verticale	3 variables	-457.821***	0.728	0.506***	1.162***	0.9921	0.9905
		2 variables	-403.154***	-	0.506***	1.162***	0.9903	0.9890

Tableau 13 : Coefficients des modèles linéaires pour la donnée de la valeur moyenne de la force verticale durant la phase où le sol reste fixe verticalement avec $p < 0.001^{***}$, $p < 0.01^{**}$ et $p < 0.05^*$.

			Coefficients					
Effecteur	Orientation	Modèle linéaire multiple	Constante	Variable 1: Enfoncement	Variable 2 : Pression	Variable 3 : Vitesse	Multiple R ²	Adjusted R ²
Prothèse	Attaque Talon	3 variables	-710.990***	-0.200	0.477***	0.025	0.9908	0.9895
		2 variables	-725.990***	-	0.477***	0.025	0.9907	0.9898
	Attaque Milieu	3 variables	-246.349*	0.586	0.433***	-0.781***	0.9365	0.9265
		2 variables	-201.081*	-	0.432***	-0.777***	0.9350	0.9285
	Attaque Avant	3 variables	-855.934*	2.755	0.793***	-0.941*	0.8737	0.8500
		2 variables	-612.785*	-	0.778***	-0.946*	0.8639	0.8479
Forme Rigide	Verticale	3 variables	-784.071***	-0.093	0.500***	0.129	0.9986	0.9983
		2 variables	-791.071***	-	0.500***	0.129	0.9985	0.9983

3.2.5.3. Conclusion du modèle dynamique

Premièrement, nous notons l'absence d'effet du niveau d'amplitude maximale d'enfoncement de la tige du vérin pneumatique (50 et 100 mm) sur la force verticale. Cependant, nous notons que plus le temps de montée est long (et par conséquent dans nos tests le niveau d'enfoncement est important) et plus nous observons des oscillations de la force verticale durant la période de montée du système de la crémaillère. Ce qui veut dire qu'idéalement dans le paramétrage des trajectoires de pilotage, il faudra intégrer si possible des déplacements du système de la crémaillère les plus courts possible afin d'éviter des oscillations parasites sur la courbe de force verticale provenant de la latence du régulateur de pression de notre système pneumatique.

Deuxièmement, nous pouvons voir que l'utilisation d'une prothèse a une influence sur la force de réaction verticale comparée à une forme rigide en bois. Il est possible que cette forme rigide qui est utilisée comme patron pour la mise en forme des chaussants ne soit pas si indéformable qu'attendu car nous pouvons observer que les valeurs de force sont inférieures par rapport à ceux de la prothèse. Il est important de noter que l'orientation de la prothèse a une influence sur la réaction verticale et cette influence semble être moins bien expliquée par le modèle linéaire dans la position d'attaque avant-pied. Ceci est dû à la plus grande variabilité des résultats dans cette configuration. Ces résultats sont à prendre en compte afin de déterminer le pilotage adéquat du second système de déplacement suivant la simulation mécanique souhaité.

Troisièmement, nous avons la confirmation que la vitesse de montée du système de la crémaillère a une influence sur la force de réaction verticale de même que la pression. Ces résultats permettront de créer un abaque machine pour générer les trajectoires de pilotage du simulateur mécanique suivant la force de réaction verticale souhaitée en sortie de simulation mécanique.

3.3. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de présenter à la fois les machines existantes et d'expliquer le fonctionnement du simulateur construit et utilisé dans cette thèse pour la simulation d'usure. Ce chapitre permet de montrer le niveau de développement des machines qui tentent de reproduire une phase de contact du pied avec le sol pour des activités de marche et/ou de course à pied et les possibles améliorations ou choix à réaliser pour la construction d'un nouveau simulateur mécanique. Les spécifications du simulateur mécanique utilisé dans cette thèse sont présentées ainsi que son fonctionnement et les moyens de pilotage étudiés afin de pouvoir par la suite réaliser des tests d'usure. Grâce à ces informations, nous pouvons répondre à la fois à notre première question de recherche : existe-t-il des machines capables de simuler de l'usure de chaussures ? et en partie à notre seconde question de recherche portant sur l'utilisation des données de pilotage machine.

Chapitre 4 : Tests de simulation mécanique d'usure pour une activité de marche

4.1. Introduction

4.1.1. Contexte

Des tests sur le simulateur mécanique de marche et de course à pied ont déjà été réalisés afin de comprendre son fonctionnement et d'essayer de caractériser les différents systèmes de déplacement précédemment décrits (cf. 3.2.2. Spécifications machine). Une partie de ces tests (non présentés dans le manuscrit) portaient sur la création de trajectoires de simulation mécanique spécifiques à l'activité de marche. Ces tests ont été réalisés essentiellement de manière empirique en partant initialement des données biomécaniques issues des tests « au porté » (cf. Chapitre 2 : Expérimentation d'usure « au porté ») et ont fini par aboutir à la création d'une trajectoire de simulation mécanique pouvant être assimilée à de la marche. C'est cette trajectoire qui sera utilisée dans ce chapitre afin de réaliser une toute première simulation mécanique d'usure d'une chaussure de ville par le biais de sollicitations proches d'une activité de marche. A notre connaissance (cf. 3.1. Revue de littérature sur les simulateurs existants), aucune simulation mécanique n'a été rapportée dans la littérature à ce jour.

Afin de réaliser une comparaison entre les résultats du simulateur mécanique de marche et de course et les résultats de l'expérimentation d'usure « au porté », nous avons réalisé une simulation mécanique d'usure avec une chaussure neuve du même modèle que celle qui avait servi pour l'expérimentation d'usure « au porté ».

4.1.2. Objectifs

Plusieurs objectifs sont mis en avant durant cette expérimentation :

- ✘ Tester le pilotage du simulateur mécanique de marche et de course à pied sur un grand nombre de cycles machine.
- ✘ Déterminer la répétabilité et la bio-fidélité de la simulation mécanique de la machine à différents instants au cours de l'expérimentation.
- ✘ Quantifier l'usure que le produit chaussant a subie suite à la simulation mécanique et comparer cette usure à celle réalisée par des testeurs humains (cf. Chapitre 2 : Expérimentation d'usure « au porté »).

- ✘ Explorer le dispositif de simulation mécanique afin d'obtenir des informations clés comme le temps de simulation, les pannes machines, etc.

4.2. Méthode

4.2.1. Equipement

4.2.1.1. Chaussure

Au cours de cette simulation mécanique, le test était réalisé sur un seul modèle de chaussure. Ce modèle était une paire de chaussure de ville type « sneakers », à savoir les chaussures Adidas Stan Smith.

4.2.1.2. Dispositifs d'enregistrement de la cinématique et de la dynamique

Le dispositif d'enregistrement de la dynamique était celui présent sur le simulateur, à savoir la plateforme de force sur-mesure (cf. 3.2.2.4. Instrumentation machine) avec une fréquence d'acquisition fixée à 2000 Hz.

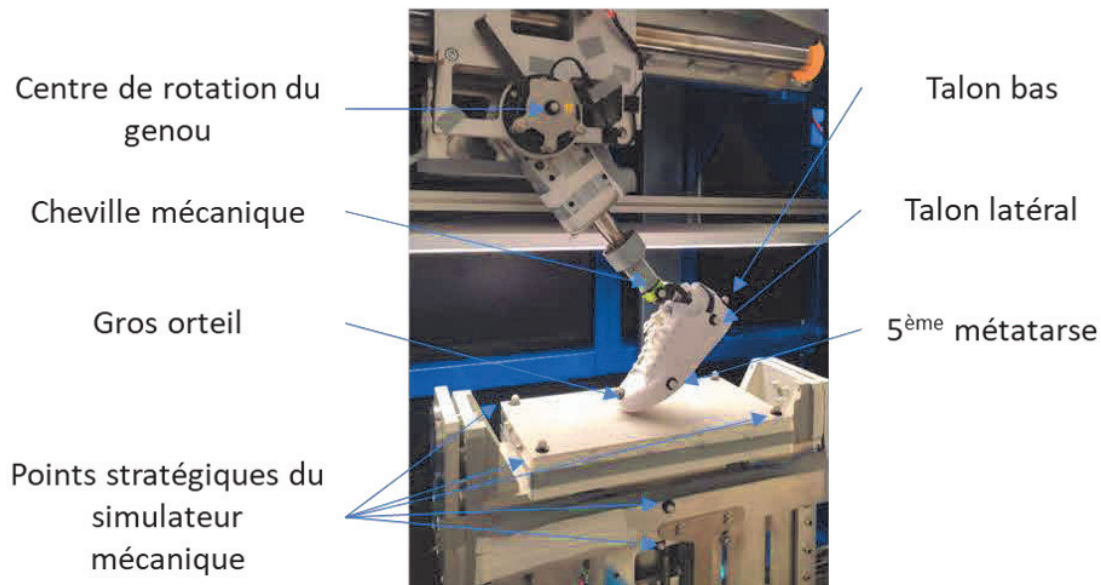


Figure 33 : Position des 6 marqueurs sur la jambe mécanique.

Le dispositif d'enregistrement de la cinématique était semblable à celui utilisé lors de l'expérimentation d'usure « au porté » avec cette fois uniquement trois caméras (Kestrel 2200, Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, CA, USA) de la marque Motion Analysis (CA, USA) avec une fréquence d'acquisition de 200 Hz. En effet, la place disponible dans le local du simulateur ne permettait pas de mettre en place une configuration avec plus de

caméras. Le simulateur était équipé de 14 marqueurs réfléchissants dont 6 sur la jambe mécanique (Figure 33) : centre de rotation du genou, cheville mécanique, talon bas, talon latéral, 5^{ème} métatarsale, gros orteil et 8 autres marqueurs sur des points stratégiques du simulateur mécanique.

4.2.2. Trajectoire de pilotage du simulateur mécanique

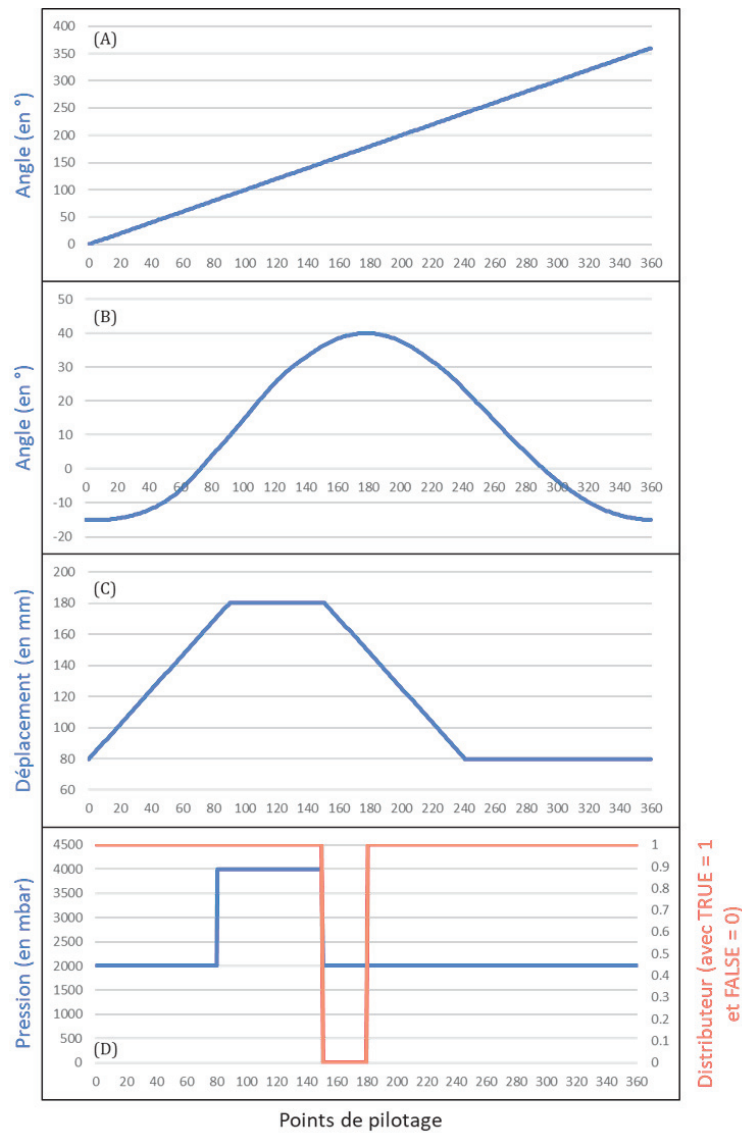


Figure 34 : Trajectoire de pilotage du simulateur mécanique pour (A), le système de bielle/manivelle (en °) pour (B), l'inclinaison de la pièce intermédiaire par rapport à la direction verticale (en °) pour (C), le système à crémaillère (en mm) pour (D), le vérin pneumatique avec la pression (en bleu et en mbar) et l'état du distributeur (en orange et en TRUE/FALSE).

La trajectoire de pilotage du simulateur mécanique est issue de tests réalisés essentiellement de manière empirique en partant initialement des données biomécaniques issues des tests « au porté » (cf. Chapitre 2 : Expérimentation d'usure « au porté »). Ces différents tests portaient d'une part, sur la compréhension globale du mécanisme de pilotage du simulateur et d'une autre part, sur la gestion de l'interaction entre l'effecteur final et le sol mobile.

La [Figure 34](#) présente les courbes de pilotage de chacun des actionneurs utilisés pour réaliser l'action de contact du pied avec le sol qui permettra de réaliser cette simulation mécanique d'usure avec une vitesse machine de 30 tr/min.

4.2.3. Procédure

Lors de cette comparaison, le simulateur mécanique réalisait un certain nombre de cycles avec pour objectif de simuler une usure de la chaussure. Afin de pouvoir comparer les données du simulateur mécanique avec celles des tests d'usure « au porté », nous avons repris le nombre de pas moyen effectué par nos six sujets afin d'arriver au premier palier de 30 jours d'utilisation puis au second palier de 60 jours d'utilisation. Comme le simulateur mécanique ne dispose que d'une seule jambe mécanique et donc d'une seule chaussure à user, nous avons divisé par deux le nombre de pas moyen réalisés par nos testeurs humains pour les deux paliers d'usure. Cela donnait donc un premier palier à 89 084 cycles machines et un second palier à 173 122 cycles machines. Nous avons ainsi pu réaliser 3 mesures moyennées sur 50 cycles :

- ✘ Au moment où la chaussure est à l'état neuf (Test initial qui équivaut à 0 jour d'utilisation).
- ✘ Au moment où la chaussure atteint le palier des 89 084 cycles (Test intermédiaire qui équivaut à 30 jours d'utilisation).
- ✘ Au moment où la chaussure atteint le palier final des 173 122 cycles (Test final qui équivaut à 60 jours d'utilisation).

4.2.4. Analyse

4.2.4.1. Bio-fidélité et répétabilité de la simulation mécanique

La bio-fidélité peut se définir comme la capacité de la simulation mécanique à reproduire la phase de contact du pied avec le sol de manière comparable à la réalité sur testeurs humains. Pour cela, nous pouvons nous appuyer sur les données issues des tests d'usure « au porté » et ainsi comparer les données de la cinématique et de la dynamique de la marche entre la machine et l'humain à un palier d'usure donné. Pour cette analyse, nous allons nous intéresser à la première mesure de notre test de simulation mécanique d'usure lorsque la chaussure est à l'état neuf. Afin de pouvoir comparer les données de la plateforme de forces issues du simulateur mécanique avec celle des testeurs humains, le

signal de force (en newton) du simulateur a été moyenné sur les 50 cycles enregistrés puis exprimés en poids de corps (BW) suivant 4 poids différents qui sont arbitrairement choisis à 70, 80, 90 et 100 kg. En effet, le pilotage n'a pas été spécifiquement défini pour correspondre à un sujet d'une anthropométrie donnée. Pour vérifier si des différences étaient présentes entre le premier test avec les testeurs humains et celui du simulateur mécanique (tests avec chaussure à l'état neuf), des tests t pour échantillons indépendants ont été réalisés. La normalité de chaque échantillon et l'homogénéité des variances ont été vérifiées. Dans le cas où l'homogénéité des variances n'était pas vérifiée, un test paramétrique de Welch a été effectué. Dans le cas où la normalité d'un des échantillons n'était également pas vérifiée, un test non-paramétrique de Mann Whitney a été réalisé. La taille d'effet a été analysée par le D de Cohen pour les tests paramétriques, et par un coefficient de rang biserial pour le test non paramétrique.

La répétabilité peut se définir comme la capacité d'un système à reproduire le même signal lors de plusieurs mesures enchainées. Dans le cas du simulateur mécanique, cette répétabilité consiste en sa capacité à reproduire le même « pattern » de marche au cours des différents cycles machine lors d'un enregistrement pour un palier d'usure donné. Cette capacité à être répétable est nécessaire pour appliquer la même contrainte au fur et à mesure des cycles aux chaussures et pouvoir détecter des possibles différences d'usure ensuite entre les différents paliers d'usure. Dans notre analyse, l'hypothèse faite est que la simulation mécanique sera plus répétable dans la production du « pattern » de marche que les testeurs humains et engendrera ainsi moins de variations au niveau des indices d'intérêt calculés. Si tel est le cas, on peut supposer que le simulateur mécanique aurait la possibilité de mieux détecter les différences d'usure dans l'évolution de la vie des chaussures en comparaison des méthodes de test standard. Comme dans d'autres études antérieures (Ronkainen et al., 2010), une approche par le coefficient de variation a été utilisée. Le coefficient de variation a été calculé pour chaque variable précédemment mesurée lors des tests « au porté » du Chapitre 2 : Expérimentation d'usure « au porté ». Afin de faciliter l'accès à l'information, le rapport entre le coefficient de variation du simulateur et le coefficient de variation des testeurs humains à 3 et 5 km/h a été réalisé. Ce rapport entre variations du simulateur et variations des testeurs humains a été transformé sous forme de pourcentage et communique une information sur la répétabilité du simulateur vis-à-vis des données des tests in vivo. En effet, lorsque cette valeur est positive, elle donne l'information de combien, en proportion, le coefficient de variation du simulateur est supérieur au coefficient de variation des testeurs humains. Si c'est le cas, le simulateur est alors moins répétable que les testeurs humains du fait d'une variabilité produite entre les cycles plus importante. Lorsqu'elle cette valeur est négative, elle donne l'information de combien, en proportion, le coefficient de variation du simulateur est inférieur au coefficient de variation des testeurs humains. Dans ce cas, le simulateur est plus répétable que les testeurs humains. Il produit moins de variations entre les cycles que les testeurs humains entre chaque appui.

4.2.4.2. Usure du produit chaussant au cours du test

Afin d'analyser l'usure de la chaussure au cours de la simulation mécanique, deux méthodes ont été utilisées :

- ✘ L'analyse des données de la cinématique et de la dynamique, de la phase de contact du pied avec le sol, issues de la simulation mécanique d'usure.
- ✘ L'analyse visuelle de la détérioration extérieure de la chaussure et notamment de l'abrasion de la semelle.

L'analyse de l'évolution de la cinématique et de la dynamique de la phase de contact du pied avec le sol entre les paliers d'usure suit l'hypothèse suivante : le but est de reproduire les résultats des essais « au porté » et dans ce cas ces résultats n'indiquaient pas d'évolution entre les paliers d'usure. Ceci devait donc aboutir à des patterns de marche équivalents entre les essais mesurés à 0, 30 et 60 jours d'utilisation. Pour vérifier ceci, des ANOVAs à mesures répétées à un facteur ont été réalisées pour comparer les variables mesurées (similaires aux tests du Chapitre 2 : Expérimentation d'usure « au porté ») afin de vérifier si des évolutions apparaissaient entre les 3 paliers d'usure.

L'analyse de l'évolution de la détérioration extérieure de la chaussure et notamment de l'abrasion de la semelle est réalisée à l'aide de deux solutions qui sont : un scanner 3D (Scan In a Box, Open Technologies) (Figure 35) et un appareil photo. Ainsi à chaque palier d'usure, un scan de la chaussure est réalisé et plusieurs photos des chaussures sont prises. Afin de vérifier si des évolutions d'usure apparaissent entre les paliers, les photos sont comparées entre elles par un opérateur formé qui déterminera l'évolution de l'usure de la chaussure (localisation et zone) tandis que les scans seront eux aussi comparés entre eux afin de déterminer le niveau d'abrasion de la semelle.

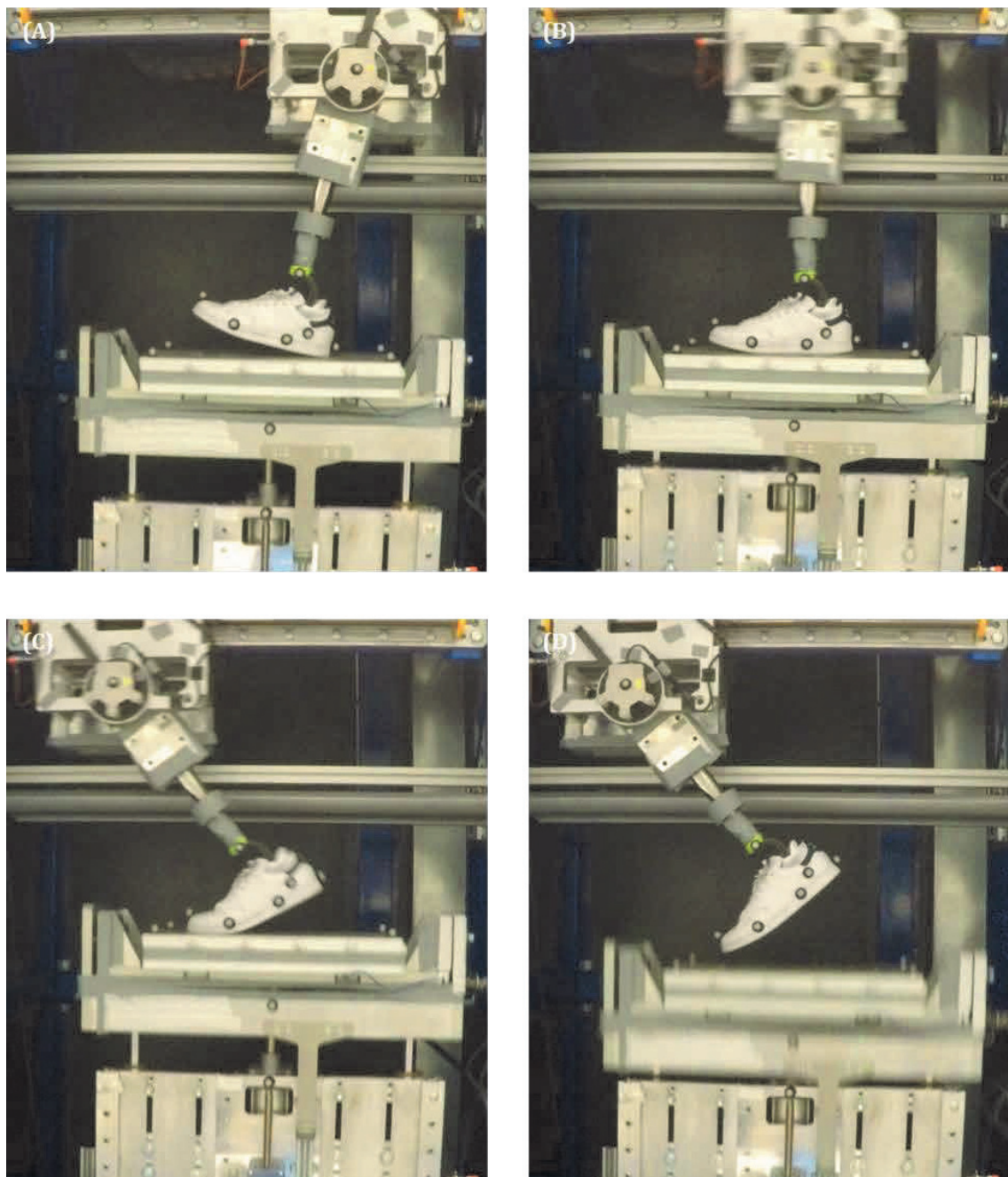


Figure 35 : Système de scanner 3D du dispositif « Scan In a Box ».

4.3. Résultats

4.3.1. Analyse descriptive

La [Figure 36](#) présente le déroulé du pied par rapport au sol de la simulation mécanique pour le test initial à l'instant où la chaussure est à l'état neuf.



[Figure 36](#) : Simulation mécanique du test d'usure pour le test initial avec (A), l'instant d'attaque du pied avec le sol mobile suivit de (B), la phase du pied à plat puis de (C), la phase de propulsion et pour finir de (D), l'instant de décollage du pied avec le sol.

La simulation mécanique d'usure a mis 7 jours afin d'arriver à notre second palier d'usure simulant une utilisation de 60 jours d'utilisation de la chaussure. Durant ces 7 jours, le simulateur mécanique a tourné pendant 96 heures entrecoupées d'un certain nombre d'arrêts dont celui nécessaire pour réaliser l'acquisition des données du palier d'usure simulant les 30 jours d'utilisation de la chaussure. Les autres arrêts ont été occasionnés lors de bugs du système de pilotage qui ont engendré l'arrêt de la simulation mécanique d'usure jusqu'à ce qu'un opérateur vienne relancer la machine afin de continuer le test. Ces arrêts pouvant survenir à n'importe quel moment (pendant la journée comme pendant la nuit), la simulation mécanique d'usure prévue pour durer 4 jours a finalement pris plus longtemps que prévu.

4.3.2. Bio-fidélité et répétabilité de la simulation mécanique

4.3.2.1. Bio-fidélité

Les résultats de la comparaison des données de la cinématique et de la dynamique de la marche entre la machine et l'humain (vitesse de marche à 3 et 5 km/h) pour le test initial qui équivaut à 0 jour d'utilisation sont présentés dans le [Tableau 14](#) pour les variables temporelles et cinématiques et le [Tableau 15](#) pour les variables dynamiques tandis que la [Figure 37](#) permet de visualiser la force de réaction verticale et la [Figure 38](#) permet de visualiser la force de réaction antéro-postérieure.

On peut observer que, globalement, les variables temporelles sont dans le même ordre de grandeur entre la simulation et les données expérimentales. Concernant les forces de réaction, le pattern et les amplitudes de la composante verticale sont corrects. Le pattern de la composante antéro-postérieure est respecté (force de réaction négative dans la première moitié de l'appui puis positive sur la deuxième moitié), mais les amplitudes observées sur la machine sont trois à quatre fois trop importantes. Enfin l'angle d'attaque pied/sol est plus faible dans la simulation.

Dans le détail, nous pouvons voir que le simulateur mécanique a un temps de contact plus long que les testeurs humains marchant à 3 km/h ($p = 0,008$ et un D de Cohen = 2,412) et 5 km/h ($p < 0,001$ et un D de Cohen = 26,957).

Au niveau de la répartition des indices durant la phase d'appui, le temps de montée du pic passif est plus court pour le simulateur que pour les testeurs humains marchant à 3 km/h ($p < 0,001$ et un D de Cohen = -5,364) et à 5 km/h ($p < 0,001$ et un D de Cohen = -12,964). Le temps du pic actif du simulateur est plus long comparé aux testeurs humains marchant à 3 km/h ($p < 0,001$ et D de Cohen = 4,238) tandis qu'à 5 km/h il n'est pas significativement différent. Le temps de freinage est plus long pour le simulateur comparé aux testeurs humains marchant à 3 km/h ($p < 0,001$ et un D de Cohen = 19,241) et à 5 km/h ($p < 0,001$ et un D de Cohen = 11,088). Le temps de propulsion est plus court avec le simulateur vis-à-vis des testeurs humains marchant à 3 km/h ($p < 0,001$ et un

Coefficient de rang biserial = -1) et à 5 km/h ($p < 0,001$ et un Coefficient de rang biserial = -1).

Tableau 14 : Résultats de la comparaison des variables temporelles et cinématiques entre la machine et les testeurs humains (vitesse de marche à 3 et 5 km/h) pour le test initial de la chaussure Adidas Stan Smith.

Variables dépendantes temporelles	Simulateur mécanique	Données des testeurs humains à 3 km/h		Données des testeurs humains à 5 km/h	
	Valeurs	Valeurs	p	Valeurs	p
Temps de contact (s)	0,921 (0,005)	0,871 (0,029)	0,008	0,657 (0,013)	< 0,001
Temps de montée du pic passif en force (% phase d'appui)	14,4 (0,4)	26,6 (3,2)	< 0,001	23,5 (0,9)	< 0,001
Temps du pic actif (% phase d'appui)	76,9 (0,4)	73,1 (1,2)	< 0,001	77,6 (1,0)	0,223
Temps du pic de freinage (% phase d'appui)	29,4 (0,4)	18,3 (0,7)	< 0,001	18,3 (1,4)	< 0,001
Temps du pic de propulsion (% phase d'appui)	64,4 (0,6)	84,8 (1,1)	< 0,001	85,7 (1,2)	< 0,001
Variable dépendante cinématique	Simulateur mécanique	Données des testeurs humains à 3 km/h		Données des testeurs humains à 5 km/h	
	Valeurs	Valeurs	p	Valeurs	p
Angle de contact (°)	9,2 (0,2)	19,1 (4,2)	< 0,001	24,1 (3,7)	< 0,001

Tableau 15 : Résultats de la comparaison des variables dynamiques entre la machine et les testeurs humains (vitesse de marche à 3 et 5 km/h) pour le test initial de la chaussure Adidas Stan Smith.

Variables dépendantes dynamiques	Simulateur mécanique		Données des testeurs humains à 3 km/h		Données des testeurs humains à 5 km/h	
	Poids arbitrairement choisis (en kg)	Valeurs	Valeurs	p	Valeurs	p
Pic passif (BW)	70	1,396 (0,006)	1,028 (0,023)	< 0,001	1,135 (0,045)	< 0,001
	80	1,240 (0,005)		< 0,001		< 0,001
	90	1,116 (0,004)		< 0,001		0,468
	100	1,015 (0,004)		0,349		< 0,001
Pic actif (BW)	70	1,190 (0,032)	1,015 (0,043)	< 0,001	1,189 (0,058)	0,953
	80	1,058 (0,028)		0,004		0,002
	90	0,952 (0,026)		0,015		< 0,001
	100	0,866 (0,023)		< 0,001		< 0,001
Pic de freinage (BW)	70	-0,686 (0,005)	-0,121 (0,012)	< 0,001	0,211 (0,017)	< 0,001
	80	-0,610 (0,004)		< 0,001		< 0,001
	90	-0,549 (0,004)		< 0,001		< 0,001
	100	-0,499 (0,004)		< 0,001		< 0,001
Pic de propulsion (BW)	70	0,435 (0,008)	0,135 (0,013)	< 0,001	0,232 (0,021)	< 0,001
	80	0,387 (0,007)		< 0,001		< 0,001
	90	0,348 (0,006)		< 0,001		< 0,001
	100	0,316 (0,006)		< 0,001		< 0,001
Taux de charge (BW/s)	70	12,928 (0,386)	5,066 (1,162)	< 0,001	7,836 (0,639)	< 0,001
	80	11,492 (0,343)		< 0,001		< 0,001
	90	10,342 (0,309)		< 0,001		< 0,001
	100	9,402 (0,281)		< 0,002		0,002

Au niveau des résultats de la force verticale des testeurs humains pour la marche à 3 km/h (Figure 37. A), la valeur du pic passif simulé avec le poids le plus lourd de 100 kg pourrait correspondre à la valeur du pic passif des testeurs ($p = 0,349$). Le taux de charge du simulateur est quant à lui deux fois plus important par rapport à la marche humaine quel que soit le poids choisi. Le pic actif est lui trop important pour un poids simulé de 80 kg ($p = 0,004$, D de Cohen = 1,378) mais trop faible pour un poids de 90 kg ($p = 0,015$, D de Cohen = 1,378). Au niveau des résultats de la force antéro-postérieure (Figure 38. A), la valeur de force de freinage est toujours trop importante vis-à-vis des 4 poids choisis ($p < 0,001$) et c'est également le cas pour le pic de propulsion ($p < 0,001$).

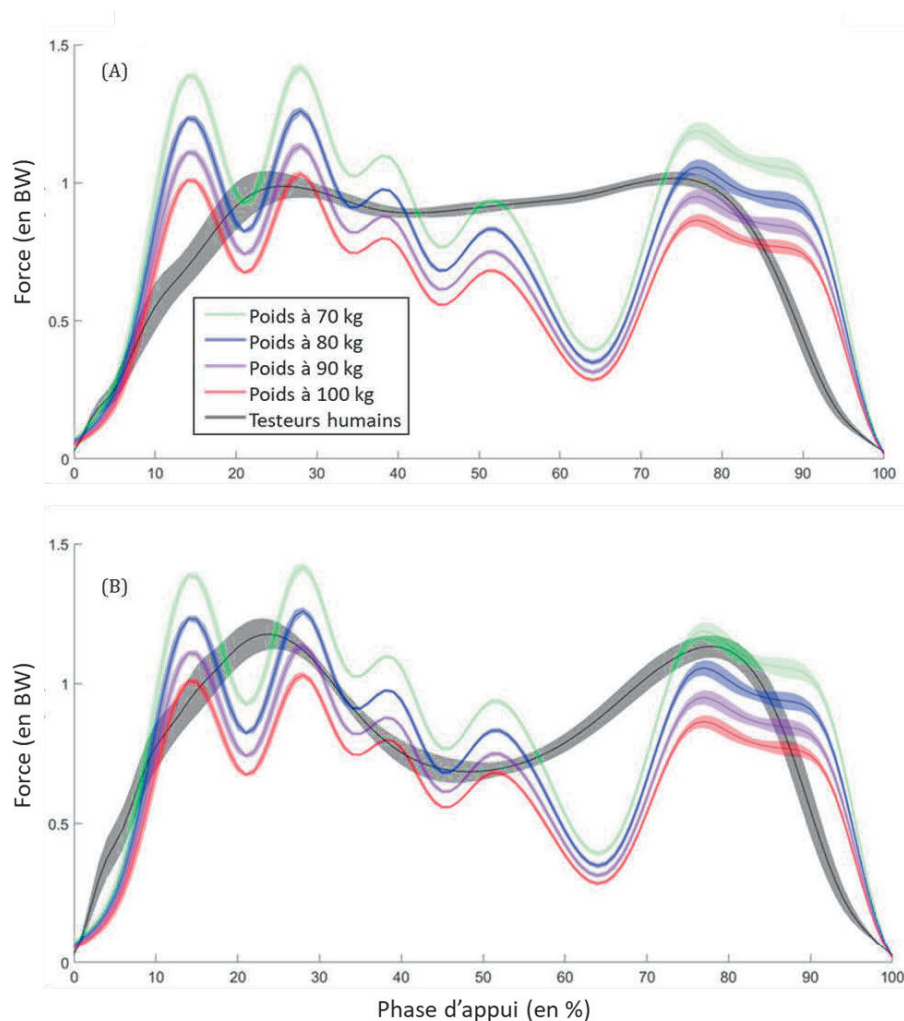


Figure 37 : Force de réaction verticale moyenne des testeurs humains pour (A), la marche à 3 km/h et pour (B), la marche à 5 km/h en comparaison avec les signaux de force du simulateur avec les 4 poids choisis.

Au niveau des résultats de la force verticale des testeurs humains pour la marche à 5 km/h (Figure 37. B), seul le pic passif simulé avec le poids de 90 kg pourrait correspondre

à la valeur de pic passif des testeurs ($p = 0,468$). Le taux de charge est, comme à 3 km/h toujours, trop élevé. Le pic actif pourrait lui correspondre à une personne de 80 kg ($p = 0,953$). Au niveau des résultats de la force antéro-postérieure (Figure 38. B), la valeur de force de freinage est également toujours trop importante vis-à-vis des 4 catégories de poids simulées ($p < 0,001$) et c'est également le cas pour le pic de force de propulsion.

L'angle d'attaque est beaucoup plus faible pour le simulateur comparé aux testeurs humains à 3 km/h ($p < 0,001$ et un Coefficient de rang biserial = -1) et à 5 km/h ($p < 0,001$ et un Coefficient de rang biserial = -1).

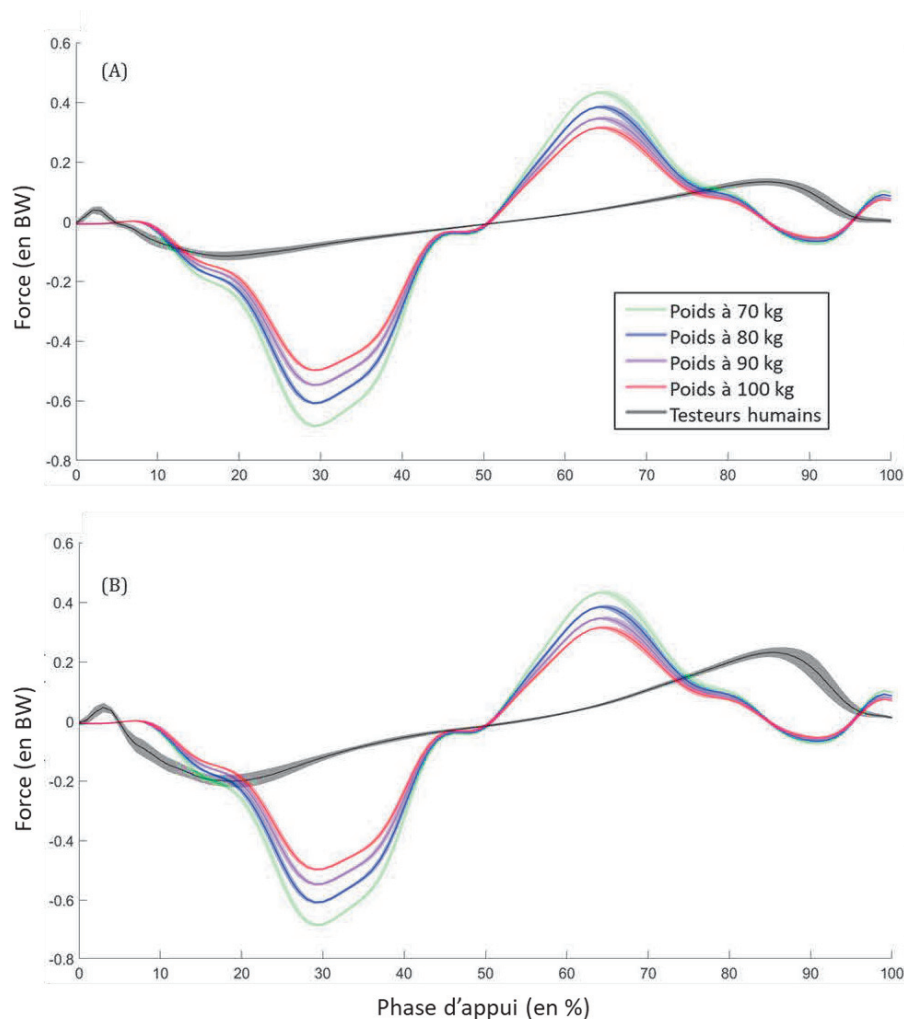


Figure 38 : Force de réaction antéro-postérieure moyenne des testeurs humains pour (A), la marche à 3 km/h et pour (B), la marche à 5 km/h en comparaison avec les signaux de force du simulateur avec les 4 poids choisis.

4.3.2.2. Répétabilité

Les résultats du rapport entre le coefficient de variation du simulateur et le coefficient de variation des testeurs humains à 3 et 5 km/h (exprimés sous forme de pourcentage) pour les données de la cinématique et de la dynamique sont présentés dans le Tableau 16 pour les variables dynamiques et le Tableau 17 pour les variables temporelles et cinématiques.

Tableau 16 : Tableau des résultats du rapport entre le coefficient de variation du simulateur et le coefficient de variation des testeurs humains à 3 et 5 km/h (en %) pour les variables temporelles et cinématiques avec en vert, les résultats où le simulateur est plus répétable que les testeurs humains et en rouge les résultats où le simulateur est moins répétable que les testeurs humains.

Variables temporelles	Vitesse	Différence dans la variation 0 jours (%)	Différence dans la variation à 30 jours (%)	Différence dans la variation 60 jours (%)
Temps de contact	3km/h	- 81	- 82	- 73
	5km/h	- 67	- 72	- 56
Temps de montée du pic passif en force	3km/h	- 71	- 69	- 50
	5km/h	- 55	- 45	- 42
Temps du pic actif	3km/h	- 86	- 89	- 77
	5km/h	- 53	- 68	- 36
Temps du pic de freinage	3km/h	- 91	- 93	- 87
	5km/h	- 87	- 89	- 84
Temps du pic de propulsion	3km/h	- 30	- 22	24
	5km/h	32	87	82
Variable cinématique	Vitesse	Différence dans la variation à 0 jours (%)	Différence dans la variation à 30 jours (%)	Différence dans la variation 60 jours (%)
Angle d'attaque	3km/h	- 76	- 76	- 65
	5km/h	- 6	- 50	26

Tableau 17 : Tableau des résultats du rapport entre le coefficient de variation du simulateur et le coefficient de variation des testeurs humains à 3 et 5 km/h (en %) pour les variables dynamiques avec en vert, les résultats où le simulateur est plus répétable que les testeurs humains et en rouge les résultats où le simulateur est moins répétable que les testeurs humains.

Variables dynamiques	Vitesse	Différence dans la variation 0 jours (%)	Différence dans la variation à 30 jours (%)	Différence dans la variation 60 jours (%)
Pic passif	3km/h	- 85	- 88	- 81
	5km/h	- 85	- 88	- 85
Pic actif	3km/h	25	- 63	- 43
	5km/h	- 12	- 75	- 57
Pic de freinage	3km/h	- 94	- 91	- 77
	5km/h	- 92	- 86	- 70
Pic de propulsion	3km/h	- 81	- 78	- 79
	5km/h	- 68	- 59	- 63
Taux de charge	3km/h	- 79	- 72	- 53
	5km/h	- 71	- 60	- 59

Concernant les variables temporelles, le simulateur semble plus répétable que les testeurs humains pour tous les indices excepté le temps de propulsion qui semble devenir moins répétable suivant l'avancement de l'usure et notamment pour la marche à 5 km/h (test initial = 32 %, test intermédiaire = 87 % et test final = 81 %). Au niveau des variables dynamiques, le simulateur est également plus répétable que les testeurs humains pour toutes les variables mesurées excepté le pic actif lors du test initial de marche à 3 km/h (25 %). L'angle d'attaque semble lui également plus répétable lors des tests sur le simulateur sauf lors du test final pour la marche à 5 km/h (26 %).

4.3.3. Usure du produit chaussant au cours du test

4.3.3.1. Données issues de la phase de contact du pied avec le sol

Les résultats des données, correspondant à la phase de contact du pied avec le sol, issues de simulation mécanique d'usure sont présentés dans le [Tableau 18](#) pour les variables dynamiques et le [Tableau 19](#) pour les variables temporelles et cinématiques tandis que la [Figure 39](#) permet de visualiser les forces de réaction verticale et antéro-postérieure.

Tout d'abord, on observe que globalement les différences des variables temporelles bien que significatives restent faibles. Dans le détail, nous pouvons observer que le temps de contact du simulateur diminue au fur et à mesure de la simulation mécanique d'usure ($p < 0,001$). En parallèle de ce temps de contact qui diminue, le temps de montée du pic passif augmente et arrive plus tard dans la phase d'appui ($p < 0,001$). Le temps du pic actif arrive également plus tard dans la phase d'appui mais seulement au dernier test à 60 jours comparé aux deux premiers. On observe également que le temps de freinage augmente et surtout durant le test final. De même, le temps de propulsion augmente dans la phase d'appui dès le test intermédiaire puis revient à une valeur similaire à celle du test initial.

Au niveau des variables dynamiques ([Figure 39](#)), la valeur du pic passif diminue de façon importante dès le test intermédiaire puis semble se stabiliser sur le test final. La valeur du pic actif augmente de façon importante dès le test intermédiaire puis se stabilise pour le test final. Le taux de charge quant à lui diminue de façon importante dès le test intermédiaire puis se stabilise également sur le test final. Le pic de freinage diminue dès le test intermédiaire puis augmente durant le test final pour venir en dessous de la valeur du test initial. Le pic de propulsion suit une évolution opposée au pic de freinage avec une augmentation dès le test intermédiaire puis il diminue lors du test final en restant au-dessus de la valeur du test initial.

Pour finir, l'angle d'attaque augmente de 10 % dès le test intermédiaire puis se stabilise durant le test final.

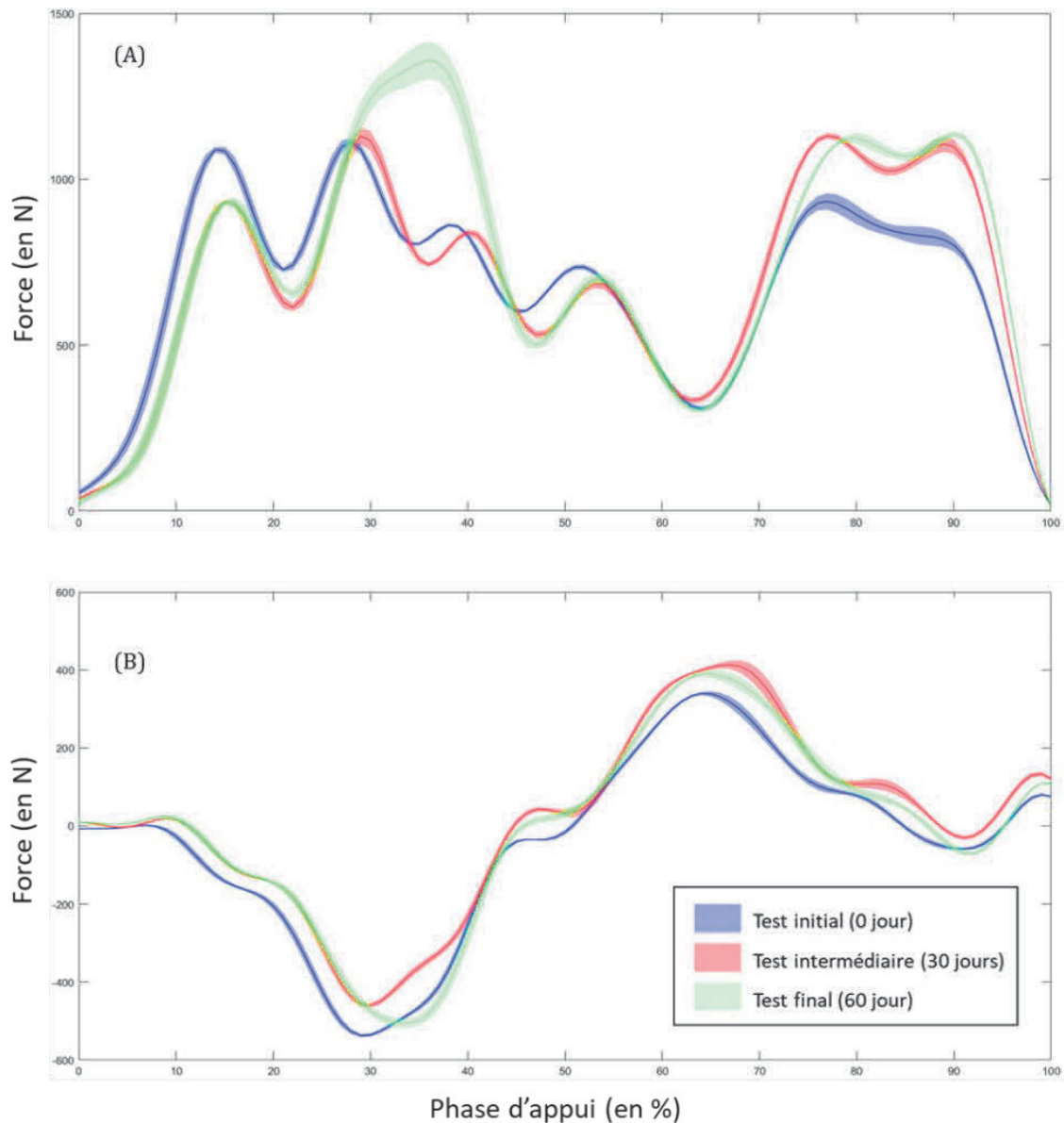


Figure 39 : Courbes pour (A), des forces verticales et pour (B), des forces antéro-postérieures produites par le simulateur mécanique suivant les différents paliers du test d'usure.

Tableau 18 : Tableau des résultats de la simulation mécanique pour les variables dynamiques. *Différence significative entre le test initial et le test intermédiaire. **Différence significative entre le test initial et le test final. ***Différence significative entre le test intermédiaire et le test final.

Variables dynamiques	Test initial qui équivaut à 0 jour d'utilisation	Test intermédiaire qui équivaut à 30 jours d'utilisation	Test final qui équivaut à 60 jours d'utilisation	P
Pic passif (N) ***	1095.2 (4.4)	936.6 (3.2)	938.7 (2.7)	< 0.001
Pic actif (N) ***	934.0 (25.0)	1131.0 (8.7)	1125.4 (14.5)	< 0.001
Pic de freinage (N) *** **	- 538.3 (3.9)	- 461.5 (5.9)	-507.7 (13.3)	< 0.001
Pic de propulsion (N) *** **	341.2 (6.3)	416.1 (8.7)	392.4 (7.3)	< 0.001
Taux de charge (N/s) ***	10 145.8 (303.0)	8 199.5 (290.5)	8 280.4 (381.7)	< 0.001

Tableau 19 : *Tableau des résultats de la simulation mécanique pour les variables temporelles et cinématiques. *Différence significative entre le test initial et le test intermédiaire. **Différence significative entre le test initial et le test final. ***Différence significative entre le test intermédiaire et le test final.*

Variables temporelles	Test initial qui équivaut à 0 jour d'utilisation	Test intermédiaire qui équivaut à 30 jours d'utilisation	Test final qui équivaut à 60 jours d'utilisation	P
Temps de contact (s) * **	0.921 (0.005)	0.917 (0.004)	0.916 (0.006)	< 0.001
Temps de montée du pic passif en force (% phase d'appui) * **	14.4 (0.4)	15.4 (0.4)	15.5 (0.5)	< 0.001
Temps du pic actif (% phase d'appui) * ** * ** *	76.9 (0.4)	77.3 (0.3)	79.6 (0.5)	< 0.001
Temps du pic de freinage (% phase d'appui) * ** * ** *	29.4 (0.6)	29.8 (0.3)	33.6 (0.6)	< 0.001
Temps du pic de propulsion (% phase d'appui) * ** *	64.4 (0.6)	66.9 (1.0)	64.7 (1.0)	< 0.001
Variable cinématique	Test initial qui équivaut à 0 jour d'utilisation	Test intermédiaire qui équivaut à 30 jours d'utilisation	Test final qui équivaut à 60 jours d'utilisation	P
Angle d'attaque (°) * **	9.5 (0.3)	10.4 (0.4)	10.4 (0.5)	< 0.001

4.3.3.2. Données de la détérioration extérieure de la chaussure

Au cours du test de simulation mécanique d'usure, la chaussure n'a subi aucune dégradation à la fois au niveau de la tige (partie supérieure de la chaussure) et au niveau de la zone de liaison entre la tige et la semelle de la chaussure. Nous avons uniquement observé une usure au niveau de la semelle de la chaussure. Afin de quantifier cette usure, la [Figure 40](#) présente la solution avec la prise de photo pour chaque palier de test et la [Figure 41](#) présente la solution de comparaison des scans de chaussure réalisés avec le scanner 3D.

Avec la méthode de prise de photo, il nous est uniquement possible de constater l'évolution de la taille des zones d'usure situées au niveau de la semelle de la chaussure. Nous pouvons voir que ces dernières ont tendance à s'élargir de façon croissante au fur et à mesure de la simulation mécanique d'usure. Lors du test final ([Figure 40. C](#)), l'usure au niveau de la zone du talon et de l'avant-pied est équivalente entre le côté latéral et le côté médial de la chaussure. Nous notons également que l'abrasion de la semelle semble plus prononcée sur la zone de l'avant-pied comparée à la zone du talon.

Avec la méthode de scan de la semelle de la chaussure, nous comparons l'altitude des picots du motif de la semelle entre les différents paliers d'usure afin de caractériser le niveau d'abrasion en millimètres de la semelle. Cette méthode n'a malheureusement pas fonctionné à cause de problèmes de repositionnement des scans de chaussures et de possibles déformations de la chaussure (objet fortement déformable que ce soit la tige ou la semelle) lors des scans, bien que les scans aient été réalisés avec la chaussure mise sur une forme de montage. Cela s'est traduit par des résultats aberrants (zone bleue sur la [Figure 41](#)).

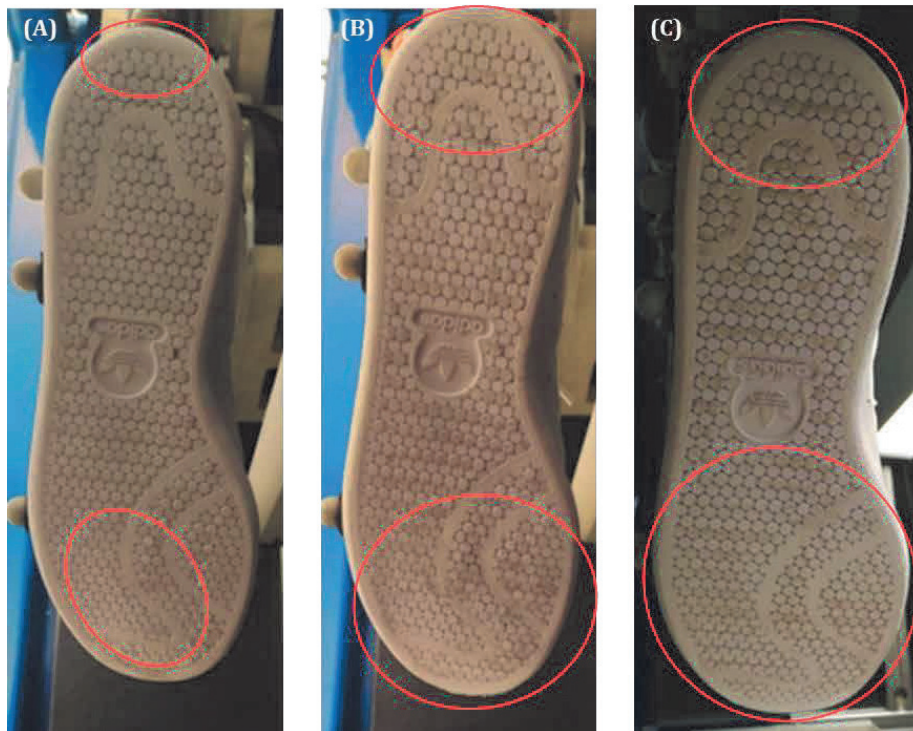


Figure 40 : Etat de la semelle pour (A), le test initial puis pour (B), le test intermédiaire simulant 30 jours d'utilisation et pour (C), le test final simulant 60 jours d'utilisation avec en rouge l'évolution des zones d'abrasion se développent au niveau du talon et de l'avant pied de la semelle de la chaussure.

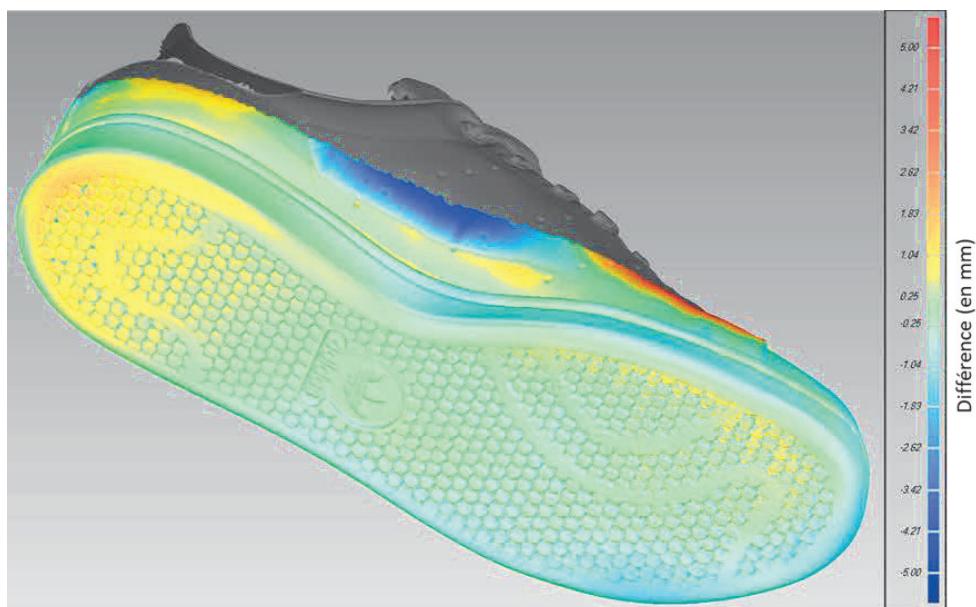


Figure 41 : Comparaison du niveau d'abrasion entre le scan de la chaussure lors du test initial et après le test final d'usure. Les différences sont exprimées en mm avec en rouge une différence maximale où la chaussure a perdu « de la matière » et en bleu une différence maximale où la chaussure a gagné « de la matière ».

4.4. Discussion

4.4.1. Bio-fidélité et répétabilité de la simulation mécanique

4.4.1.1. Bio-fidélité

A première vue, les résultats issus du simulateur mécanique pour le test initial semblent quelque peu différents du « pattern » du mouvement réalisé par les testeurs humains. En effet, on observe sur la force verticale de forte oscillation entre 10 et 30 % de la phase d'appui, qui n'existe pas dans la réalité, suivi d'une diminution de l'effort entre 30 et 70 % de la phase d'appui, bien trop importante par rapport à la réalité, et pour finir un pic actif qui semble avoir une amplitude de force correcte mais avec une durée plus longue que la réalité. Malgré ces différences, nous retrouvons une forme de courbe proche de celle obtenue lors de la marche avec une montée en charge lors du contact du pied avec le sol puis une diminution de l'effort lors du passage du pied à plat pour finir par une augmentation de l'effort appliqué avant que le pied ne quitte le sol et que la force ne diminue jusqu'au moment de décollement du pied du sol. De même, pour la force antéro-postérieure nous retrouvons une forme de courbe très proche de celle obtenue lors de la marche avec une phase de freinage et une phase de propulsion répartie de manière assez proportionnelle. Néanmoins, les amplitudes de force des pics de freinage et de propulsion sont 5 à 6 fois plus élevées que dans la réalité. L'angle d'attaque du pied est quant à lui deux fois moins important pour le simulateur que dans la réalité quelle que soit la vitesse de marche des testeurs humains.

En ce qui concerne le temps de contact, il semble que nous sommes plus proches d'un temps de contact correspondant à un mouvement de marche à 3 km/h plutôt qu'à 5 km/h. Ceci s'explique du fait du choix de la vitesse de tour machine fixée à 30 tr/min, ce qui correspond à un temps de 2 secondes pour réaliser les 360 points de pilotage que constitue un cycle machine. Ainsi pour parcourir les 180 premiers points de pilotage qui constituent la phase de contact du pied avec le sol (cf. 3.2.3.2. Les phases de pilotage), il faut 1 seconde et comme le contact du pied avec le sol s'effectue pendant les 20 premiers points de pilotage et que le décollage du pied se réalise aux alentours du 160^{ème} point de pilotage nous obtenons un temps de contact légèrement inférieur à la seconde. Afin d'obtenir un temps de contact plus réaliste, il faudrait augmenter la vitesse de tour machine et par conséquent réaliser un abaque de pilotage machine pour cette vitesse de tour machine en tenant compte du temps nécessaire pour parcourir les 180 points de cette phase de pilotage.

En comparant les résultats avec les machines existantes (Figure 42), il semble que cette première simulation soit prometteuse. En effet, dans notre recensement des dispositifs reproduisant la phase d'appui du pied avec le sol, seul Jones (2014) réalise une simulation mécanique de marche (simulant une vitesse de 1.5 ± 0.1 m/s soit environ 5.4 km/h).

Lorsque le robot 6 axes simule mécaniquement la phase d'appui, il n'arrive pas à générer le pic passif adéquat de la force de réaction verticale mais la magnitude du pic actif est cependant acceptable (Figure 42. A). Au niveau de la force de réaction antéro-postérieure, l'amplitude est trop importante et il n'y a pas de phase de propulsion (Figure 42. B). Le temps de contact au sol est quant à lui deux fois plus long que la réalité pour cette vitesse de marche.

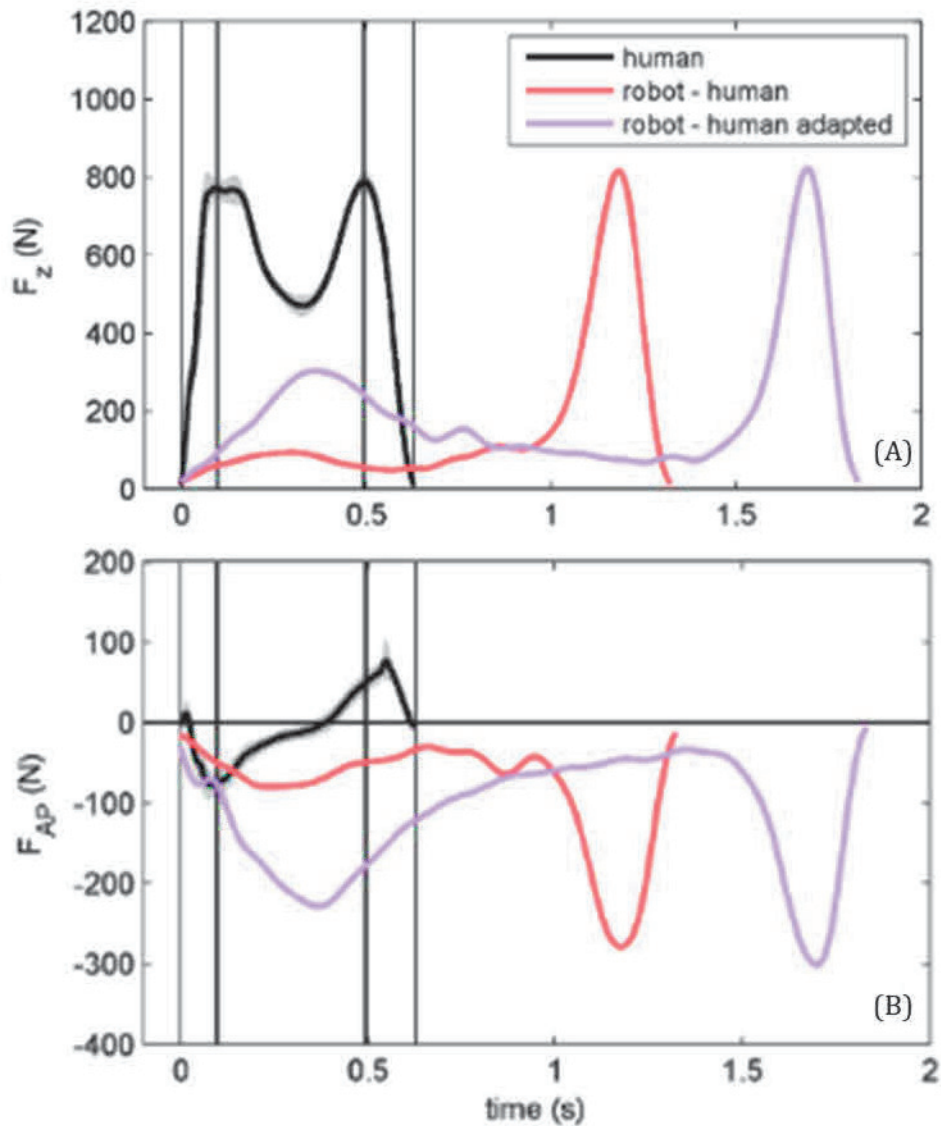


Figure 42 : Forces de réaction pour (A), suivant l'axe vertical et pour (B), suivant l'axe antéro-postérieur issus des simulations mécaniques des travaux de Jones (2014) pour deux types de programmation basée sur les données de testeurs humains.

Dans le cadre d'une marche à 3 ou à 5 km/h, on voit que si nous souhaitons attribuer les valeurs des pics passifs et actifs (de la force verticale) à un choix de poids d'un potentiel

testeur humain, on se retrouve sur des poids assez élevés : entre 80 et 100 kg pour la marche à 3 km/h et entre 70 et 90 kg pour la marche à 5 km/h. Cela est quelque peu supérieur à la moyenne des poids de nos testeurs humains pour l'expérience d'usure « au porté » (masse corporelle = 74.9 ± 6.1 kg). Afin de mieux moduler les forces de contact du pied avec le sol, une optimisation du pilotage du système de crémaillère et de vérin pneumatique semble nécessaire (cf. Chapitre 5 : Génération de trajectoires de pilotage du simulateur mécanique).

4.4.1.2. Répétabilité

Les résultats de l'analyse de la répétabilité, nous permettent de voir que le simulateur est globalement plus répétable que les testeurs humains pour un même palier d'usure quelle que soit la variable analysée (hormis deux exceptions). Cela reste inchangé au cours du test d'usure pour les 3 paliers d'usure mesurés. Ces résultats sont dans la même lignée que ceux précédemment obtenus dans la littérature malgré les différences de conception et de pilotage machine. Notre dispositif présente donc certains des avantages des tests déjà existants comme les tests de chaussures en laboratoire physique qui sont plébiscités notamment pour leur répétabilité de mesure.

4.4.2. Usure du produit chaussant au cours de la simulation

4.4.2.1. Données issues de la phase de contact du pied avec le sol

Au vu des résultats, les variables de la cinématique et de la dynamique issues du simulateur mécanique évoluent au cours du test d'usure. En effet, à chaque palier d'usure, on a pu observer de légères augmentations ou diminutions de certaines variables contrairement à ce que l'on avait pu voir lors des tests d'usure « au porté » (cf. Chapitre 2 : Expérimentation d'usure « au porté »). Ainsi il semblerait que, pour une trajectoire de pilotage qui reste inchangée du début du test d'usure jusqu'à la fin, les propriétés physiques de certains éléments (machine, effecteur final, chaussure, etc.) changent et influencent alors les résultats des différents paliers. Cela pourrait être attribué à la possible évolution des propriétés mécaniques de la chaussure qui se transforme au cours du test d'usure. Cependant nous avons pu voir que ces évolutions avaient peu d'effet sur les variables de la cinématique et de la dynamique des testeurs humains. Il est donc plus probable que ce soit dû aux modifications de la compliance de l'interface effecteur final et sol avec un changement des propriétés mécaniques de la prothèse de pied et cheville. Dans ces conditions, il est pour l'instant difficile d'utiliser ces différentes variables afin de statuer sur l'évolution de l'usure en termes de propriétés mécaniques au cours de notre test de simulation mécanique. Afin de pouvoir prétendre à utiliser ces données, il faudrait ajouter à chaque palier d'usure un test de caractérisation de l'effecteur final pour savoir si nous usons plus la prothèse (voire le mécanisme de déplacement du simulateur) ou la chaussure. La réalisation de tests physiques sur les chaussures est aussi tout à fait

faisable, ce qui amène à penser que l'utilisation conjointe du simulateur et des tests physiques (dans la lignée de ce qui a été fait avec les tests « au porté », cf. Chapitre 2 : Expérimentation d'usure « au porté ») pourrait être envisagée comme un essai complet sur les produits chaussants. Enfin, il serait nécessaire de réaliser un test d'usure avec plus de cycles afin d'obtenir des altérations de la chaussure plus importantes, impliquant des différences dans les caractéristiques de l'interaction chaussure/sol potentiellement plus importantes.

4.4.2.2. Données de la détérioration extérieure de la chaussure

Le test de simulation mécanique d'usure permet de recréer de l'abrasion au niveau de la semelle sans pour autant créer de l'usure au niveau de la tige et la jonction entre celle-ci et la semelle. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus lors des tests d'usure « au porté » avec les testeurs humains où nous avons pu observer un résultat similaire au niveau des zones d'usure (talon et avant-pied). Cependant avec le simulateur mécanique, il semble que la zone de l'avant-pied soit bien plus impactée que celle du talon. Cela peut s'expliquer d'une part avec notre effecteur final qui est une prothèse rigide peu déformable au niveau de l'articulation métatarso-phalangienne et d'une autre part avec la trajectoire de pilotage du simulateur mécanique qui, au moment du décollage du pied du sol, réalise un léger glissement du pied par rapport au sol.

Suivant les testeurs humains nous observons également que l'usure peut être plus ou moins marquée sur un côté de la chaussure (latéral et/ou médial) avec pour la zone du talon, le côté latéral qui est plus usé et pour la zone de l'avant-pied, le côté médial de la chaussure qui est plus usé. Ce résultat est propre au déroulé du pied de chacun de nos testeurs. A l'avenir, il pourrait être pris en compte et intégré dans le pilotage du simulateur avec la mise en action du moteur de rotation du sol dans le plan frontal (jusqu'ici non utilisé) afin de venir contraindre plus ou moins un côté de la chaussure durant la phase d'appui du pied sur le sol.

4.4.3. Utilisation du simulateur

En comparaison avec les tests d'usure « au porté », nous pouvons voir que le simulateur est bien plus rapide pour simuler l'usure d'une chaussure. En effet, les testeurs humains avaient mis 37 semaines pour atteindre un nombre pas similaire à ce que le simulateur à réaliser en l'espace de 7 jours malgré les bugs machine. Hormis ces différents bugs machines qui devront être corrigés en améliorant notamment la programmation de l'IHM (Magelis) et du contrôleur du simulateur (Modicon LMC 058), le simulateur mécanique d'usure est un test relativement simple avec peu de manipulations à réaliser pour lancer un test, une fois les paramètres de pilotage établis. En matière de comparaison, nous sommes sur le même nombre d'opérations que pour la réalisation d'un test physique en laboratoire permettant par exemple de mesurer le coefficient de transfert du talon (Méthode CTC P-CH-002).

4.5. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de montrer la faisabilité d'un test d'usure sur un simulateur mécanique reproduisant la phase d'appui du pied avec le sol. Nous avons également pu comparer les résultats obtenus de ce test avec ceux des tests d'usure « au porté » avec des testeurs humains afin de tenter de quantifier l'écart et de juger la bio-fidélité du test sur simulateur mécanique. Grâce aux résultats présentés, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- ✘ Le temps mis par le simulateur mécanique pour user une chaussure sur le même nombre de cycles que les testeurs humains est presque 4 fois plus rapide. Cependant, la fiabilité de la machine reste à améliorer, notamment au niveau de l'IHM.
- ✘ La répétabilité du simulateur mécanique est supérieure à celle des testeurs humains tandis que la bio-fidélité reste encore à un niveau faible avec notamment le besoin d'atteindre des amplitudes de force et d'angle similaire à la réalité. Il est cependant important de rappeler que les caractéristiques des interactions chaussure-sol obtenues sont similaires voire meilleures par rapport aux résultats proposés dans la littérature (Jones, 2014). Il faut aussi rappeler que nous manquons d'informations sur la relation entre le niveau de bio-fidélité des interactions et l'usure simulée mécaniquement de la chaussure.
- ✘ Le simulateur mécanique est capable de produire de l'usure et notamment au niveau de la semelle de la chaussure. Pour tenter d'obtenir de l'usure au niveau de la tige de la chaussure et de la liaison de celle-ci avec la semelle, il faudrait sûrement réaliser un plus grand nombre de cycles.
- ✘ La quantification de l'usure sur le simulateur n'est, pour le moment, pas normée comme pour les tests physiques en laboratoire. Les résultats des méthodes présentées pour quantifier l'usure au-delà d'une analyse qualitative restent mitigés car bien trop subjectifs et ne permettent pas de rendre compte, par exemple, du niveau d'abrasion de la semelle de la chaussure.
- ✘ La reproduction du mouvement de la phase d'appui du pied sur le sol par le simulateur mécanique reste à améliorer par le biais de créations de trajectoires automatisées. Ce sera l'objet du prochain chapitre.
- ✘ Cette étude est, à notre connaissance, la première à présenter des résultats objectifs lors de l'utilisation sur un grand nombre de cycle d'une machine de test visant à reproduire des interactions pieds/sol et donc une usure bio-fidèle.

Chapitre 5 : Génération de trajectoires de pilotage du simulateur mécanique

5.1. Introduction

5.1.1. Contexte

Le simulateur mécanique est capable de réaliser un test de simulation mécanique d'usure pour une activité de marche avec un certain niveau de bio-fidélité (cf. Chapitre 4 : Tests de simulation mécanique d'usure pour une activité de marche). Néanmoins, la trajectoire de pilotage utilisée pour réaliser ce test est issue d'une méthode basée sur une série de tests menés de façon empirique dans le but de simuler mécaniquement la phase d'appui du pied par rapport au sol lors de la marche. Il serait possible de réaliser d'autres trajectoires en suivant cette démarche cependant, le temps de création d'une telle trajectoire et la bio-fidélité du résultat de la simulation mécanique sont pour l'instant assez aléatoires. Il est par conséquent difficilement envisageable de créer d'autres trajectoires de pilotage pour le simulateur mécanique de cette manière. Ainsi, une méthode de génération de trajectoires de pilotage du simulateur mécanique tenant compte de certaines variables biomécaniques issues de tests « au porté » avec des testeurs humains a été mise en place et testée afin d'essayer de simuler mécaniquement différentes allures de marche, voire de course à pied, et différentes attaques du pied sur le sol.

5.1.2. Objectifs

Plusieurs objectifs sont mis en avant dans ce chapitre :

- ✘ Déterminer une stratégie de pilotage prenant en compte les contraintes de conception du mécanisme du simulateur de marche et de course à pied.
- ✘ Créer une méthode de génération automatique de trajectoire de pilotage du simulateur mécanique pouvant notamment modifier la vitesse du mouvement et l'attaque du pied sur le sol.
- ✘ Explorer la possibilité de simuler une activité de course à pied sur le simulateur mécanique.
- ✘ Tester et conclure sur la qualité des trajectoires issues de cette méthode de génération automatique.

5.2. Stratégie de pilotage

5.2.1. Principe

L'objectif lors de la génération d'une trajectoire de pilotage du simulateur mécanique est de reproduire au mieux certaines caractéristiques de la marche humaine, notamment au niveau de l'interaction pied/sol et de la déformation de la chaussure au cours de la phase d'appui (cf. 4.4.1. Bio-fidélité et répétabilité de la simulation mécanique). Pour cela on s'intéresse aux forces de réaction du sol, aux vitesses relatives de la chaussure par rapport au sol, aux angulations du pied, etc. Cependant, il n'existe pas de lien direct entre ces variables et les actionneurs du simulateur mécanique. La difficulté réside en particulier dans le comportement complexe de l'ensemble pied prothétique + chaussure ainsi que du vérin pneumatique et de son régulateur. En effet, seulement une caractérisation de la compliance de cet ensemble a été réalisée suivant la composante verticale des forces de réaction du sol (cf. 3.2.5. Caractérisation des éléments compliant), mais rien d'autre n'a été exploré comme par exemple le glissement de la chaussure sur le sol ou encore la déformation de cette dernière. Une approche possible, mais complexe, pourrait être de modéliser le complexe effecteur final (pied prothétique) / chaussure et vérin pneumatique afin de déterminer les variables de pilotage. Néanmoins, dans notre cas, un des choix les plus pragmatiques est d'émettre l'hypothèse que des règles de pilotage associées à une représentation extrêmement simplifiée (effecteur final considéré comme indéformable) permettront de générer des trajectoires de pilotage cohérentes. Dans ce cas, nous chercherons à imposer les vitesses de glissements entre le complexe effecteur final / chaussure (considérée comme rigide) et le sol. Pour cela, plusieurs hypothèses seront testées, avec différentes vitesses de glissement (ou de non-glissement) entre un ou plusieurs points au niveau de la chaussure. Une stratégie de résolution hiérarchique sera mise en place avec comme priorité principale ce critère de vitesses de glissement, puis celui de l'orientation de la jambe par rapport au sol (la plus proche de la réalité), dans le respect de la contrainte précédente, afin de s'approcher des efforts au sol et déformations de la chaussure réels.

5.2.2. Contraintes de la conception machine

Afin de mettre en place une stratégie de pilotage, il faut tenir compte des contraintes suivantes issues de la conception de la machine :

- ✘ La rotation du système bielle/manivelle est continue sur les 360 points de pilotage.
- ✘ La vitesse de déplacement du chariot est imposée par la rotation du système bielle/manivelle avec pour conséquence une vitesse nulle aux points de pilotage 1/360 et 180 (points de changement de direction du déplacement du chariot) et une vitesse maximale aux points de pilotage 100 et 260 dépendant de la vitesse machine imposée (en tr/min) (Figure 43).

- ✘ Le déplacement maximal du chariot est imposé par les dimensions du système bielle/manivelle avec pour conséquence une amplitude de déplacement minimal de 25 cm et maximale de 50 cm centrée suivant le réglage de la manivelle (Figure 43). Cette amplitude de déplacement est centrée par rapport à la position du système bielle/manivelle au point de pilotage 90 ou 270 (Figure 44).
- ✘ Le système à crémaillère dispose d'une amplitude maximale de déplacement de 20 cm et le vérin pneumatique dispose d'une tige de 12 cm de long (Figure 44). L'amplitude maximale de déplacement du sol mobile est de 32 cm.
- ✘ La pièce intermédiaire, au bout de laquelle se trouve l'effecteur final, peut être allongée d'une amplitude maximale de 20 cm (Figure 44).

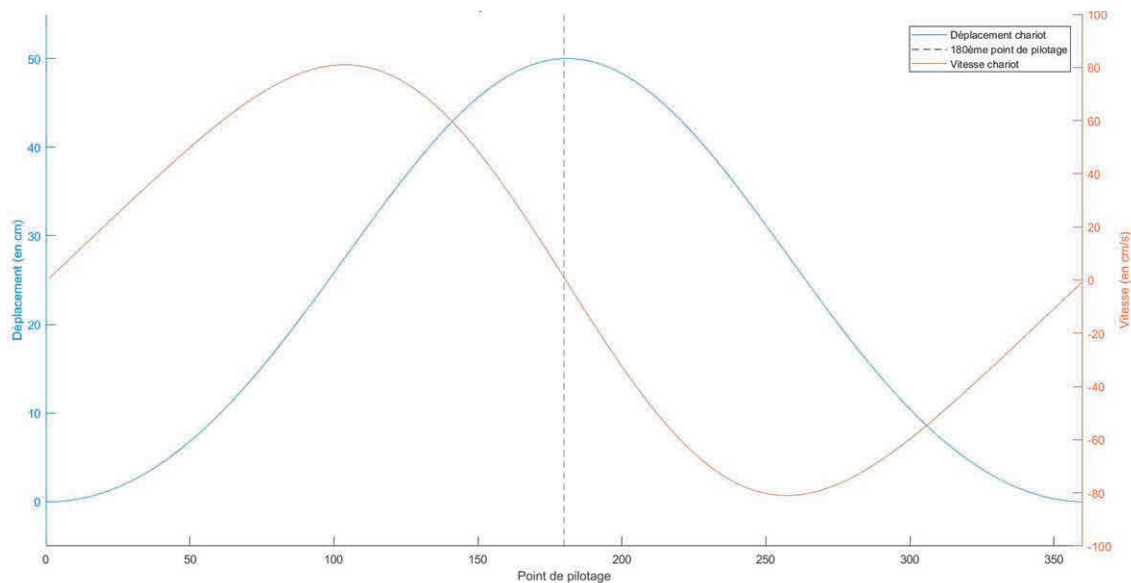


Figure 43 : Courbe d'exemple du déplacement et de la vitesse du chariot suivant les points de pilotage pour une vitesse machine de 30 tr/min.

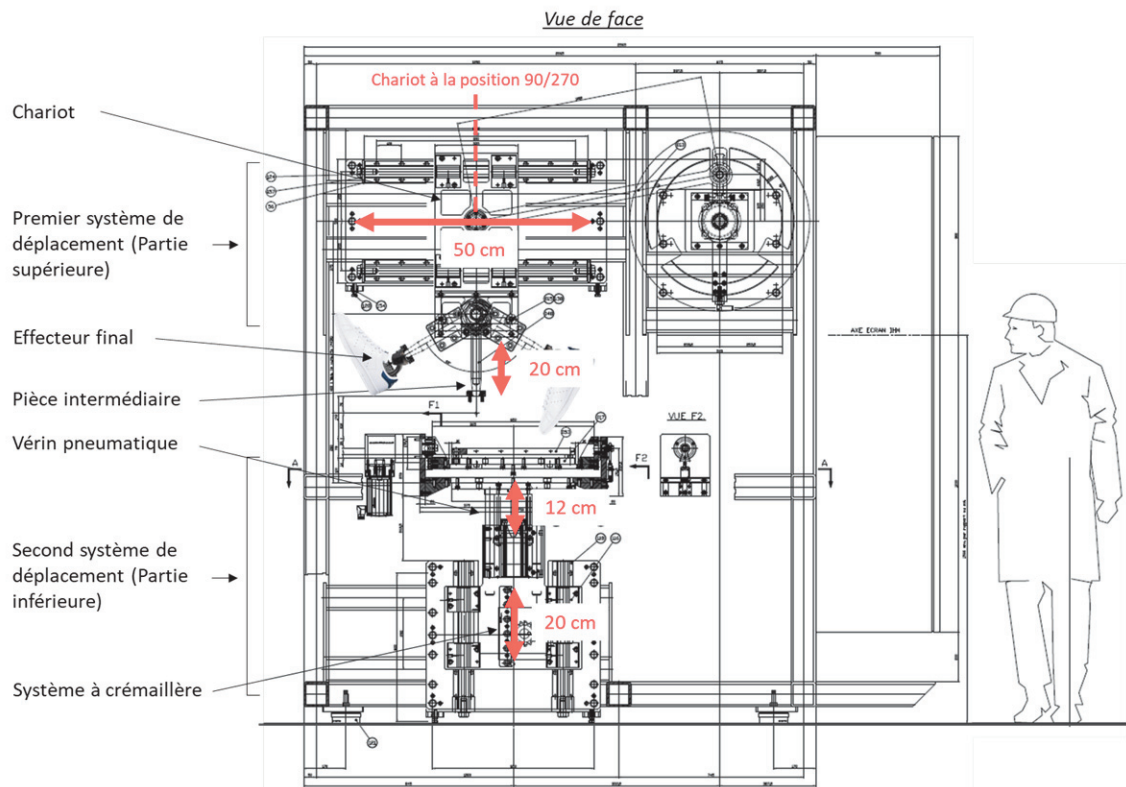


Figure 44 : Schéma du simulateur mécanique de marche et de course pied (vue de face) avec la position des différentes amplitudes de déplacement.

5.2.3. Stratégie utilisée

5.2.3.1. Partie supérieure de la machine

Lorsque le pilotage de cette partie est réalisé uniquement à l'aide de données issues de la cinématique des testeurs humains, la chaussure glisse d'avant en arrière par rapport au sol mobile et le mouvement ne représente donc pas la réalité. On cherche alors à contrôler la vitesse de glissement du pied, considéré comme rigide, par rapport au sol au cours de la phase d'appui. Pour cela nous partons des équations présentées dans le Chapitre 3 : Partie 3.2.4. Modèle cinématique de la machine. L'équation n°11 permet d'obtenir la vitesse relative d'un point du pied (noté « P ») par rapport au sol selon la direction antéro-postérieure (\dot{x}_p). Cette équation peut se réécrire :

$$\dot{\beta} (l \cos \beta - x_p \sin (\theta+\beta) - y_p \cos (\theta+\beta)) = \dot{\alpha} L \sin \alpha + \frac{-\dot{\alpha} L \cos \alpha \sin \alpha}{\sqrt{cb^2 - (L \sin \alpha)^2}} + \dot{x}_p(t) \quad (14)$$

Nous avons une équation dont les termes principaux sont :

$$[\beta_0, \dot{\beta}(t), \theta] = f(\alpha_0, \dot{\alpha}(t), \dot{x}_p(t)) \quad (15)$$

Les termes de l'équation (15) sont les suivants :

- ✘ β_0 correspond à l'angle d'orientation de la pièce intermédiaire à l'instant de contact du pied avec le sol.
- ✘ $\dot{\beta}(t)$ correspond à la vitesse de rotation de la pièce intermédiaire.
- ✘ θ correspond à l'orientation de la forme de pied dans le plan sagittal.
- ✘ α_0 correspond à la position du système bielle-manivelle à l'instant de contact du pied avec le sol.
- ✘ $\dot{\alpha}(t)$ correspond à la vitesse de rotation du système bielle-manivelle.
- ✘ $\dot{x}_p(t)$ correspond à la vitesse relative d'un point du pied par rapport au sol selon la direction antéro-postérieure au cours de la phase d'appui.

On peut noter que la rotation de la pièce intermédiaire β n'apparaît plus comme un paramètre de l'équation (15). En effet les valeurs de β sont directement obtenues par intégration de la vitesse $\dot{\beta}$ à chaque instant et à l'aide de la constante initiale β_0 .

Cette équation (15) comporte néanmoins trop d'inconnues pour pouvoir déterminer sans ambiguïté les paramètres de pilotage. Nous allons donc identifier certains de ces paramètres à l'aide d'hypothèses.

5.2.3.1.1 Choix de la vitesse machine ($\dot{\alpha}(t)$)

Le choix de la vitesse machine ($\dot{\alpha}(t)$) impacte l'ensemble des actionneurs du simulateur mécanique et joue un rôle important sur la variable du temps de contact de la phase d'appui.

On peut tout d'abord rappeler que la conception actuelle de la machine ne permet pas de faire varier cette vitesse de rotation au cours du cycle. $\dot{\alpha}$ est donc une constante.

Une première approche a consisté à déterminer cette vitesse afin d'obtenir le pilotage de β correspondant le mieux aux données de la biomécanique (Figure 46) (comme cela est fait pour déterminer la position α_0 du système bielle-manivelle à l'instant de contact du pied avec le sol, cf. 5.2.3.1.3. Choix de la position de départ dans le cycle (α_0)). Cette approche ayant été peu concluante, nous avons alors décidé, plus simplement, de baser la vitesse machine sur le temps de contact de la simulation mécanique souhaitée. Afin de se rapprocher des valeurs cibles, nous avons mis en place un abaque machine prenant en compte le nombre de points de pilotage utilisés pour simuler la phase de contact du pied avec le sol et la durée de ce contact issues des données biomécaniques.

La Tableau 20 présente un exemple de cet abaque avec deux vitesses de marche et quatre vitesses de course à pied. Si la phase d'appui est simulée mécaniquement sur l'ensemble des points de pilotage disponible (180 points), on peut voir que les vitesses machine sont supérieures à celle utilisée lors du test de simulation mécanique d'usure

(réalisé à 30 tr/min) pour les vitesses de marche (3 et 5 km/h). Il est également possible d'utiliser moins de points de pilotage (cf. 5.2.3.1.3. Choix de la position de départ dans le cycle (α_0)) et cela se traduit par des vitesses machines plus faibles (exemple avec 120 points) qui ont l'avantage de moins solliciter le mécanisme de la machine et donc potentiellement de la préserver dans le temps. Il est d'ailleurs obligatoire d'utiliser moins de points de pilotage pour les simulations mécaniques de course à des vitesses importantes (supérieure à 10 km/h) puisque la vitesse machine ne peut pas dépasser les 100 tr/min.

Tableau 20 : Exemple d'une partie de l'abaque machine du choix de l'utilisation des vitesses machine pour les simulations mécaniques en fonction du nombre de points de pilotage choisis. En vert, les combinaisons réalisables et en rouge les combinaisons non réalisables par le simulateur mécanique de marche et de course à pied.

Vitesse testeurs humains (en km/h)	3		5		8		10		12		14	
Temps de contact des testeurs humains (en s)	0.871		0.657		0.315		0.285		0.260		0.230	
Simulation mécanique sur un nombre de point de pilotage (<= 180 points)	180	120	180	120	180	120	180	120	180	120	180	120
Vitesse machine (en tr/min)	34	23	46	30	95	63	105	70	115	76	130	87

5.2.3.1.2 Choix de l'orientation de la pièce intermédiaire et de l'effecteur final (β_0 & θ)

Le choix de l'orientation de la pièce intermédiaire au moment où le pied va rentrer en contact avec le sol s'effectue à l'aide des données issues de la biomécanique. Pour cela nous récupérons l'angle formé entre le segment de la jambe et l'axe vertical dans le plan sagittal lors des tests d'usure « au porté ». Concernant la variable θ , elle permet d'orienter l'effecteur final dans le plan sagittal et ainsi obtenir un angle d'attaque du pied par rapport au sol le plus proche de la réalité à l'instant du contact du pied avec le sol mobile. Dans un premier temps, nous avons choisi de laisser l'orientation de l'effecteur final dans une position neutre avec $\theta = 0^\circ$ afin de rester en accord avec les tests de compliance précédemment réalisés (cf. 3.2.5. Caractérisation des éléments compliant).

5.2.3.1.3 Choix de la position de départ dans le cycle (α_0)

Les hypothèses précédentes permettent donc de fixer trois des paramètres de l'équation (15). Cette dernière établie alors une relation entre le profil temporel de la vitesse de rotation de la pièce intermédiaire $\dot{\beta}(t)$ et la position du système bielle-manivelle à l'instant de contact du pied avec le sol α_0 . Nous faisons alors le choix de

déterminer la valeur de α_0 qui permet d'obtenir la rotation de la pièce intermédiaire $\beta(t)$ la plus proche de l'orientation de la jambe issue des données biomécaniques.

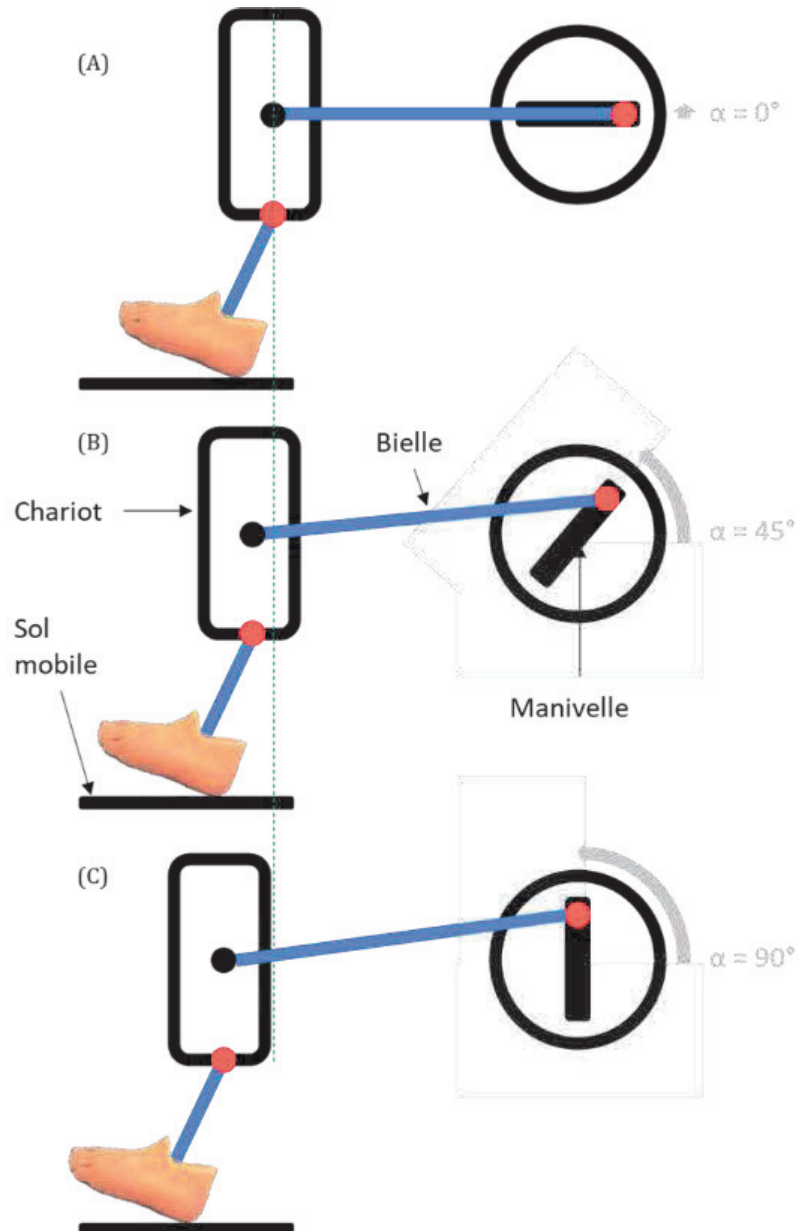
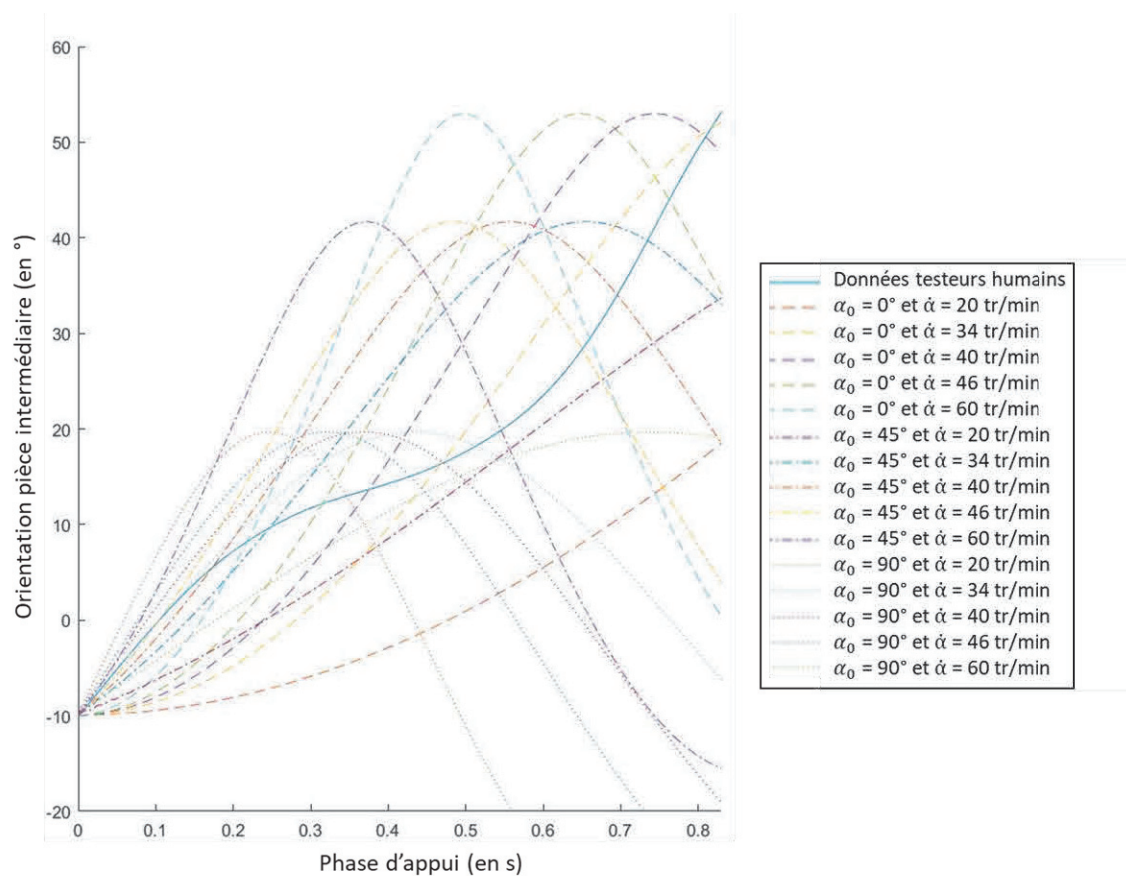


Figure 45 : Exemple de choix de position de départ dans le cycle avec trois α_0 différents : pour (A), 0° pour (B), 45° et pour (C), 90° .

La construction et le pilotage du simulateur mécanique permettent de pouvoir choisir cette position de départ de la simulation de la phase d'appui du pied avec le sol. Ce choix revient à modifier la position du chariot au moment où le pied va rentrer en contact avec

le sol mobile grâce au pilotage de l'angle du système bielle/manivelle. Suivant la courbe de pilotage de l'orientation de la pièce intermédiaire souhaitée, il peut être nécessaire de démarrer à un instant plus avancé parmi les 180 premiers points de pilotage utilisés pour la simulation de la phase d'appui (Figure 45). La Figure 46 montre le résultat de ce choix de position de départ dans le cycle pour une simulation mécanique de marche à 3 km/h avec les données des testeurs humains (trait plein bleu) comparées à un pilotage avec un α_0 démarrant à 0, 45 et 90°. On peut voir que pour cette simulation la courbe de pilotage machine de β se rapprochant le plus de la biomécanique est celle avec un $\alpha_0 = 0^\circ$.



5.2.3.2. Partie inférieure de la machine

Le pilotage de cette partie est basé sur la caractérisation présentée dans le Chapitre 3 : Partie 3.2.5. Caractérisation des éléments compliant. Cette caractérisation permet d'obtenir les relations entre la vitesse d'enfoncement du vérin et la pression du système

du vérin pneumatique d'une part et la force de réaction verticale souhaitée d'autre part. Une fois ces deux paramètres déterminés, il ne reste plus qu'à définir la hauteur initiale du système à crémaillère au moment du contact du pied avec le sol en tenant compte qu'à cet instant la tige du vérin pneumatique sera complètement sortie. Pour cela, nous prenons en compte la limite d'amplitude de déplacement de la crémaillère de 20 cm et la vitesse de montée de la crémaillère choisie à l'aide du modèle linéaire. Nous obtenons ainsi la position de départ du système à crémaillère que nous utilisons ensuite pour déterminer la longueur de la pièce intermédiaire (noté « l ») nécessaire pour que l'effecteur final et le sol entrent en contact à l'instant voulu dans le cycle.

5.3. Tests

L'objectif des différents tests est double : 1) évaluer différentes hypothèses sur la vitesse relative d'un point du pied par rapport au sol selon la direction antéro-postérieure $\dot{x}_p(t)$; 2) de fournir une preuve de concept de la stratégie de génération de trajectoires proposée en évaluant les trajectoires obtenues pour différentes vitesses de marche et course.

5.3.1. Méthode

5.3.1.1. Chaussure

Au cours de ces différents tests de simulation mécanique, un seul modèle de chaussure a été utilisé. Ce modèle était une paire de chaussure de ville type « sneakers », à savoir les chaussures Adidas Stan Smith.

5.3.1.2. Dispositifs d'enregistrement de la cinématique et de la dynamique

Le dispositif d'enregistrement de la dynamique était celui présent sur le simulateur, à savoir la plateforme de force sur-mesure (cf. 3.2.2.4. Instrumentation machine) avec une fréquence d'acquisition fixée à 2000 Hz. Pour ces tests, le dispositif d'enregistrement de la cinématique n'était cette fois pas un système de motion capture mais seulement un téléphone portable (P30 PRO, Huawei, Shenzhen, Chine) à une fréquence d'acquisition de 60 Hz.

5.3.1.3. Hypothèses et trajectoires associées

Durant les essais, nous avons testé quatre hypothèses de vitesse relative $\dot{x}_p(t)$ entre le complexe effecteur final / chaussure (considérée comme rigide) et le sol :

- ✘ Hypothèse 1 : le non-glissement du point du talon de la chaussure.
- ✘ Hypothèse 2 : le non-glissement du point du talon de la chaussure suivi du non-glissement du point du bout du pied avec pour instant de transition le passage de la pièce intermédiaire à 0° (à la verticale), inspiré de Jones (2014).

- ✘ Hypothèse 3 : le non-glissement du point du talon de la chaussure suit le non-glissement d'un point 5 cm en arrière du point situé sur le bout du pied avec pour instant de transition le passage de la pièce intermédiaire à 0° (à la verticale).
- ✘ Hypothèse 4 : une vitesse relative d'un point situé à l'aplomb de la pièce intermédiaire issue des données de la biomécanique.

Différentes vitesses de marches ont été simulées : marche à 3 km/h et 5 km/h et de la course à 14 km/h.

L'ensemble des hypothèses ont été testées pour les marches à 3 et 5 km/h. Sur la base de ces résultats, seule l'hypothèse 2 a été utilisée pour générer la trajectoire de course à 14 km/h. Pour la marche, les angles initiaux α_0 optimaux étaient systématiquement 0°, tandis qu'un angle $\alpha_0 = 45^\circ$ a été retenu pour la course à 14 km/h.

Pour les simulations mécaniques de marche à 3 km/h, le nombre de points de pilotage était de 180 points et la vitesse en tour machine de 34 tr/min. Pour les simulations mécaniques de marche à 5 km/h, le nombre de points de pilotage était de 180 points et la vitesse en tour machine de 46 tr/min. Pour la simulation mécanique de course à pied, le nombre de points de pilotage était de 133 points et la vitesse en tour machine de 96 tr/min.

5.3.1.4. Analyse

Nous allons comparer les résultats des temps de contact (obtenus à partir de la force de réaction verticale) ainsi que des forces de réaction du sol suivant l'axe vertical et l'axe antéro-postérieur pour nos différentes hypothèses de vitesse relative. L'analyse des vidéos permettra quant à elle d'évaluer de manière subjective si la méthode de rotation empêche ou non le complexe effecteur final / chaussure (considérée comme rigide) de glisser sur le sol.

5.3.2. Résultats

5.3.2.1. Tests des hypothèses

Au niveau du temps de contact, on peut voir que suivant l'hypothèse de vitesse relative choisie, ce dernier est différent pour un même pilotage de la partie inférieure de la machine (système crémaillère + vérin pneumatique). En effet, les différents tests ont pour objectifs de simuler mécaniquement une activité de marche à 3 km/h et le temps de contact cible est celui réalisé par nos testeurs humains, durant les tests d'usure « au porté », qui est de 871 ms. Le test qui s'en rapproche le plus est le test 3, avec rotation autour du point du talon de la chaussure suivi d'une rotation autour d'un point 5 cm en arrière du point situé sur le bout du pied, avec un temps de contact de 873 ms (phase d'appui (en s) de la [Figure 47](#)). Les autres tests sont soit en dessous, pour le test 1 avec 784 ms soit au-dessus pour les tests 2 et 4 avec respectivement 902 ms et 911 ms.

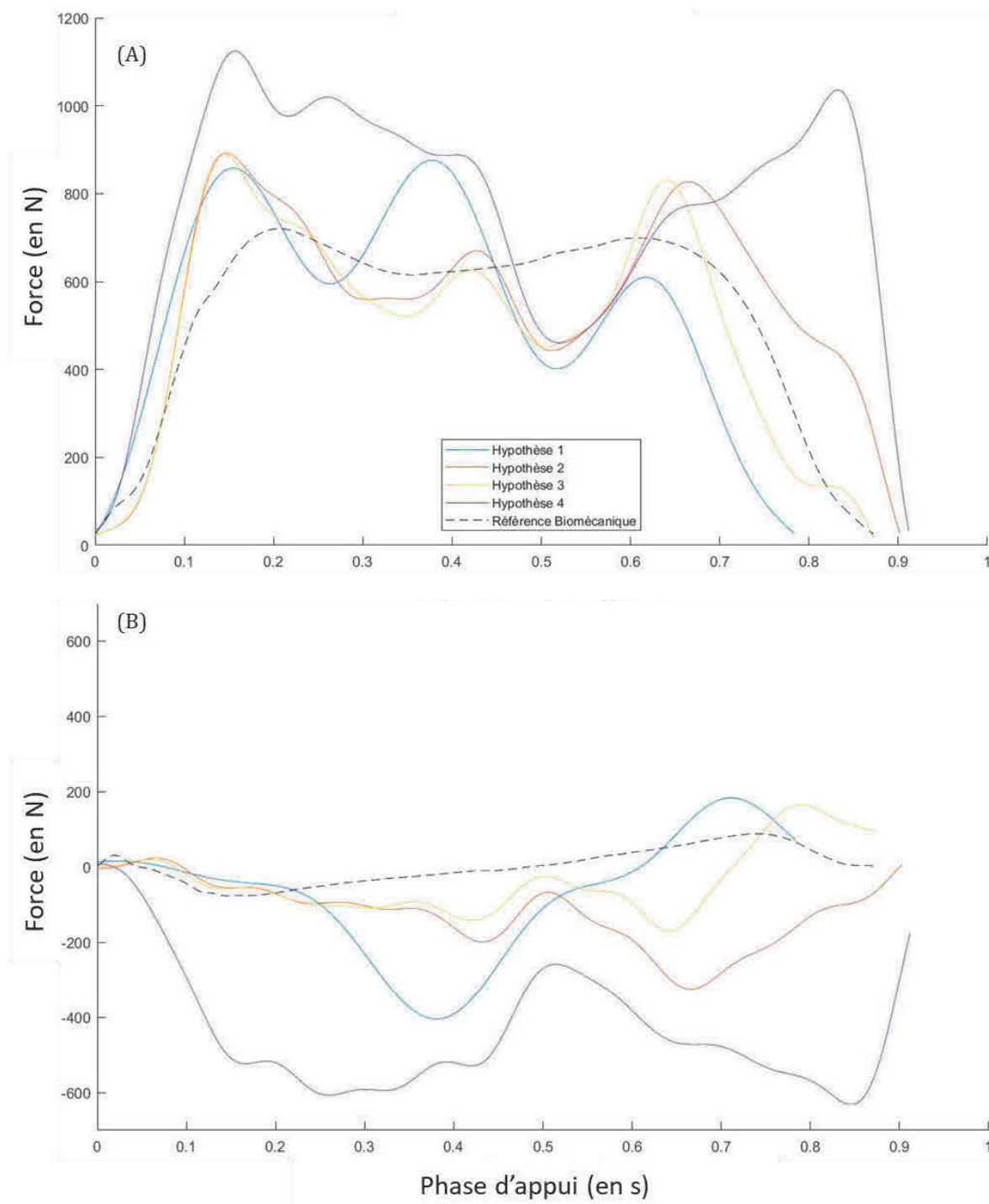


Figure 47 : Courbes pour (A), des forces verticales et pour (B), des forces antéro-postérieures produites par le simulateur mécanique suivant les différentes hypothèses permettant de simuler mécanique de la marche à 3 km/h soit une vitesse machine de 34 tr/min.

Au niveau de la force de réaction verticale (Figure 47. A), les tests 2 et 3 se rapprochent le plus du « pattern » du mouvement réalisé par les testeurs humains malgré la présence d'un faible pic d'effort au milieu de la phase d'appui là où nous devrions n'avoir qu'un creux. Les pics d'effort passif et actif sont quant à eux de même amplitude. A l'opposé, le

test 1 présente de fortes oscillations et le test 4 présente des pics voire des plateaux de force dont l'amplitude est trop élevée.

Au niveau de la force de réaction antéro-postérieure ([Figure 47. B](#)), seuls les tests 1 et 3 présentent un pic de force de propulsion bien que tardif dans la phase d'appui. Pour le test 1, nous pouvons également observer un pic de freinage alors que celui-ci n'est pas visible dans le test 3. Pour les tests 2 et 4, nous n'observons qu'une phase de freinage avec une amplitude d'effort bien différente entre les deux tests : un pic d'effort à -325 N pour le test 2 et -632 N pour le test 4.

En ce qui concerne le glissement, les enregistrements vidéo permettent de voir que seul le test 2 réalise un déroulement du pied par rapport au sol sans que le pied ne glisse en avant ou en arrière que ce soit au moment du contact initial, de la phase de pied à plat ou du décollage.

D'après ces résultats, il semble que le test qui réponde le mieux à nos objectifs soit le test 2 avec un point de non-glissement (rotation) autour du point du talon de la chaussure suivi du non-glissement du point du bout du pied. En effet, nous obtenons une courbe de force de réaction verticale proche de celle obtenue lors de la marche avec des testeurs humains et surtout un pied qui reste fixe par rapport au sol suivant l'axe antéro-postérieur au détriment d'une force de réaction antéro-postérieure qui ne présente plus de phase de propulsion.

5.3.2.2. Test des vitesses

Les tests de vitesse ont été réalisés avec l'hypothèse 2 : rotation autour du point du talon de la chaussure suivi d'une rotation autour du point du bout du pied. Au niveau du temps de contact, les différents tests ont pour objectifs de simuler mécaniquement une activité de marche à 3 km/h et à 5 km/h et une activité de course à pied à 14 km/h avec respectivement les temps de contact cibles réalisés par nos testeurs humains de 871, 657 et 230 ms (un test d'usure « au porté » pour des chaussures de course à pied avec des testeurs humains a également été réalisé mais n'est pas présenté dans ce manuscrit). Comme nous avons pu le voir précédemment, dans le cas de la simulation mécanique de la marche à 3 km/h, le temps de contact est plus long que la réalité avec 902 ms. Pour la simulation mécanique de marche à 5 km/h, cette fois le temps de contact est plus court que la réalité avec 608 ms et pour la simulation mécanique de course à pied à 14 km/h, le temps de contact est plus long avec 307 ms (phase d'appui (en s) de la [Figure 48](#)). On observe que les différences de temps contact entre les testeurs humains et la simulation mécanique sont faibles pour de la marche avec des variations qui n'excèdent jamais les 10 % du temps de contact total alors que pour la course nous sommes autour des 30 % du temps de contact total.

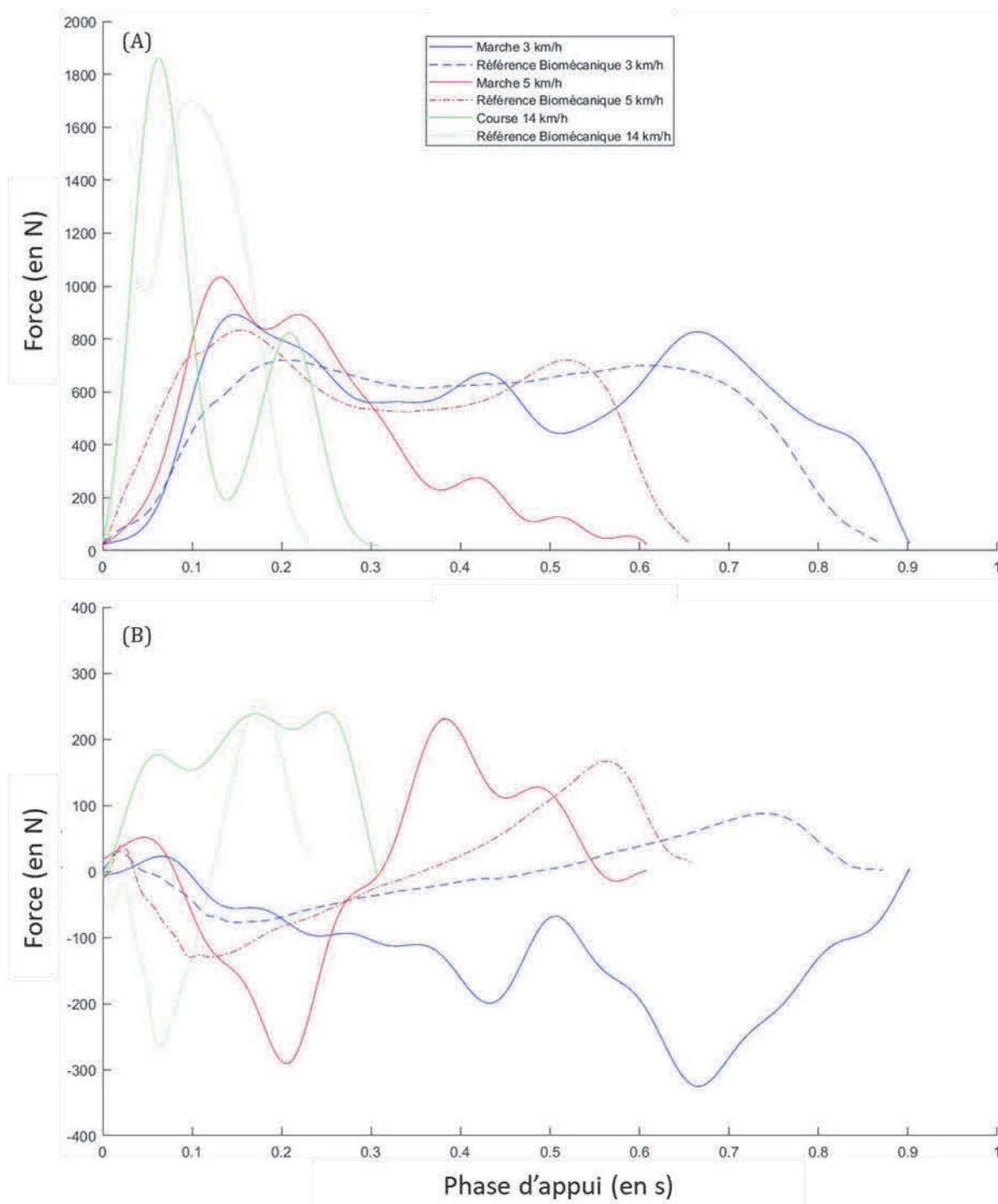


Figure 48 : Courbes pour (A), des forces verticales et pour (B), des forces antéro-postérieures produites par le simulateur mécanique suivant les différentes simulations mécaniques de vitesse de marche et de course à pied pour l'hypothèse 2 : rotation autour du point du talon de la chaussure suivie d'une rotation autour du point du bout du pied.

Au niveau de la force de réaction verticale (Figure 48. A), on peut voir que la vitesse machine a un impact sur la forme des courbes. En effet, si l'on compare les courbes issues des simulations mécaniques de marche, on observe que pour la simulation à 5 km/h, le

pic actif d'effort disparaît alors qu'il est bien présent pour 3 km/h. De même, on observe une forte oscillation de la force verticale pour la simulation mécanique de course à pied qui est bien différente de ce que l'on pourrait observer dans la réalité avec simplement une montée en charge suivie d'une diminution progressive jusqu'au décollement des orteils du sol.

Au niveau de la force de réaction antéro-postérieure ([Figure 48. B](#)), on peut voir de manière similaire à la force de réaction verticale que la vitesse machine à un impact sur la forme des courbes et que cet impact peut être complètement opposé. En effet, nous avons pu voir que pour la simulation mécanique de marche à 3 km/h, la force de réaction antéro-postérieure ne présentait qu'une phase de freinage. Cette fois pour la simulation mécanique de marche à 5 km/h, nous pouvons observer à la fois une phase de freinage et une phase de propulsion répartie de manière symétrique suivant la phase d'appui. Pour la simulation mécanique de course à pied, le résultat est complètement opposé à ce que nous avons pu observer jusque-là avec uniquement une phase de propulsion dont l'amplitude reste cohérente avec ce que nous avons pu observer dans la réalité.

En ce qui concerne le glissement, les enregistrements vidéo permettent de voir que le test de simulation mécanique de marche à 3 km/h et celui de course à pied à 14km/h réalisent un déroulement du pied par rapport au sol sans que le pied ne glisse en avant ou en arrière que ce soit au moment du contact initial, de la phase de pied à plat ou du décollage. Tandis que pour la simulation mécanique de marche à 5 km/h, nous observons un glissement du pied vers l'arrière au moment du décollement des orteils du sol.

5.4. Conclusion

Le modèle de génération de trajectoires présenté dans ce chapitre permet de simuler mécaniquement à la fois la marche et la course à pied de manière aussi bio-fidèle voire plus réaliste que la méthode basée sur des tests menés de façon empirique présentée dans le précédent chapitre. En effet, bien que cette méthode reste simple (pied considéré comme indéformable), elle permet de créer efficacement des trajectoires de pilotage mêlant des données issues de la biomécanique et les contraintes machines. Grâce aux résultats présentés, les conclusions suivantes du modèle peuvent être tirées :

- ✘ Il est possible de positionner l'effecteur final dans une position d'attaque du pied le plus fidèlement possible par rapport à la biomécanique grâce à la variable β_0 .
- ✘ Il est également possible de créer des trajectoires de pilotage qui prennent en compte la géométrie de la chaussure (notamment la taille et l'épaisseur) afin d'éviter le glissement du pied sur le sol au cours de la simulation mécanique.
- ✘ Le modèle de génération permet de spécifier le réglage de l'ensemble des actionneurs du simulateur mécanique en tenant compte des spécificités de la partie supérieure et inférieure de la machine mais aussi de leur interaction avec

par exemple le réglage automatique de certains paramétrages fixes au cours de la simulation mécanique comme celui de la longueur de la pièce intermédiaire.

- ✘ Le temps de contact s'approche voire coïncide avec celui de la biomécanique mais des variations positives ou négatives persistent. Contrairement aux autres dispositifs reproduisant la phase de contact du pied avec le sol lors de simulations mécaniques de course (Tableau 21), la différence entre la simulation et la réalité est faible (< 10 % pour de la marche et 30 % pour de la course du temps de contact cible). En effet, au mieux pour ces différents dispositifs, le temps de contact est deux fois supérieur à celui de la réalité (Ronkainen et al., 2010). Pour certaines simulations mécaniques, la machine n'est pas capable de réaliser le mouvement à la vitesse sélectionnée et ainsi la simulation est réalisée à un certain pourcentage de la vitesse réelle (Nguyen, 2017; Starker et al., 2014). Dans notre cas, afin d'optimiser cela, il serait intéressant de créer un abaque machine sur le temps de réponse entre l'ordre de montée ou de descente du changement d'état du régulateur de pression du vérin pneumatique et sa réalisation suivant la pression présente dans la chambre haute et basse du vérin pneumatique.

Tableau 21 : Information sur la différence du temps de contact cible (celui des testeurs humains réalisant un essai de course à pied) et le temps de contact simulé (celui obtenu lors de la simulation mécanique) pour les études scientifiques présentées dans la « *scooping review* » s'intéressant à l'activité de marche et de course à pied.

Etudes		Temps de contact cible (en ms)	Temps de contact simulé (en ms)
Ronkainen et al. (2010)	Attaque talon	216	612
	Attaque avant-pied	164	331
Jones (2014)		630	1340
Starker et al. (2014)		243	20, 40, 50, 60 et 80 % de la vitesse réelle → de 20 à 60 % de la vitesse réelle le temps de contact passe de 1215 à 405 ms et pour 80 % de la vitesse réelle le temps de contact est de 304 ms mais à cette vitesse le contrôle de la courbe de force n'est plus précis
Nguyen (2017)		Non mentionné. La comparaison de la simulation mécanique est réalisée avec les données d'un testeur humain courant à 12 km/h	50 et 100 % de la vitesse réelle mais à 100 % de la vitesse réelle, le mécanisme de la machine ne permet pas de simuler correctement la courbe de force
Résultats de la thèse présentés dans le Chapitre 5	Marche 3 km/h	871	902
	Marche 5 km/h	657	608
	Course 14 km/h	230	307

- ✘ Les vitesses relatives d'attaque du pied avec le sol n'ont quant à elles pas été étudiées et pourraient expliquer certains résultats au niveau des phases de freinage et de propulsion de la force antéro-postérieure. En effet, dans la

simulation mécanique de course à pied, l'attaque du pied se fait avec un $\alpha_0 = 45^\circ$ qui est bien différent de la simulation mécanique de marche où $\alpha_0 = 0^\circ$. L'attaque du pied se réalise ainsi dans une phase où le chariot du simulateur prend de la vitesse ([Figure 43](#)) sur l'axe antéro-postérieur.

✎ La bio-fidélité des forces de réaction et notamment suivant l'axe antéro-postérieur reste quant à elle à améliorer. Ce constat est similaire au niveau des autres simulateurs mécaniques. En effet, lorsqu'il cherche à simuler la vitesse réelle du mouvement, la bio-fidélité des forces de réaction diminue fortement. Un des moyens proposés est de simuler la phase d'appui de l'activité de marche ou de course à pied à un pourcentage de vitesse moindre pour conserver une courbe de force de réaction verticale proche de la réalité ([Figure 49](#)). Néanmoins, même avec une vitesse de simulation mécanique réduite, il reste complexe d'obtenir une phase de propulsion au niveau de la force de réaction antéro-postérieure. Afin d'améliorer nos résultats, il faudrait compléter le modèle de cratérisation de la compliance présenté dans la partie 3.2.5. Caractérisation des éléments compliants, qui ne s'intéressait qu'à trois positions caractéristiques de la phase d'appui du pied. Au vu des résultats, il semblerait intéressant d'explorer les différentes possibilités intermédiaires entre ces positions.

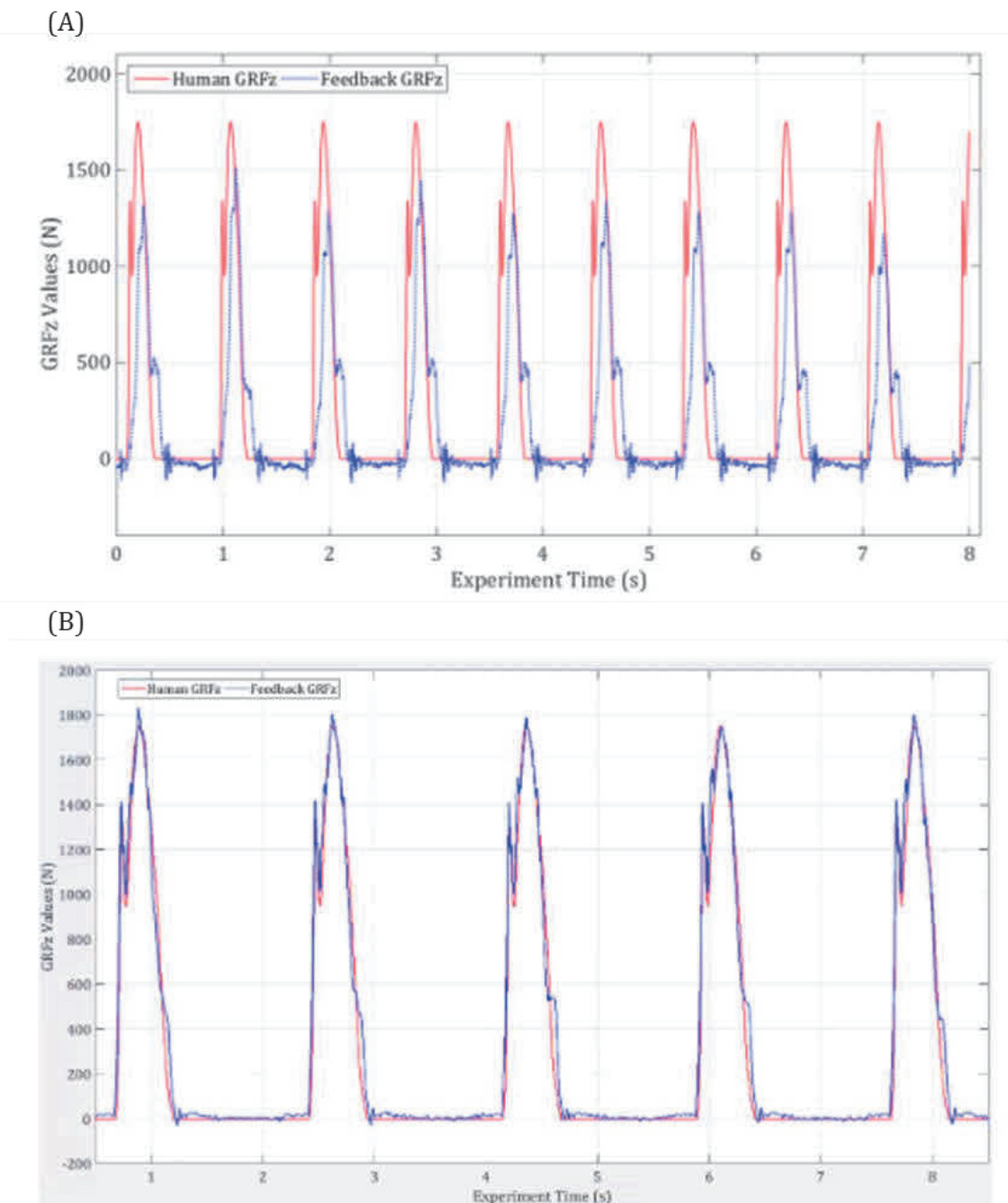


Figure 49 : Exemple de l'impact de la diminution de la vitesse de simulation mécanique (pour une activité de course à pied) sur la reproduction de la force de réaction verticale avec en bleu les données de la simulation mécanique et en rouge les données de référence d'un testeur humain pour (A), 100 % de la vitesse réelle et pour (B), 50 % de la vitesse réelle. Graphiques issus des travaux de Nguyen (2017).

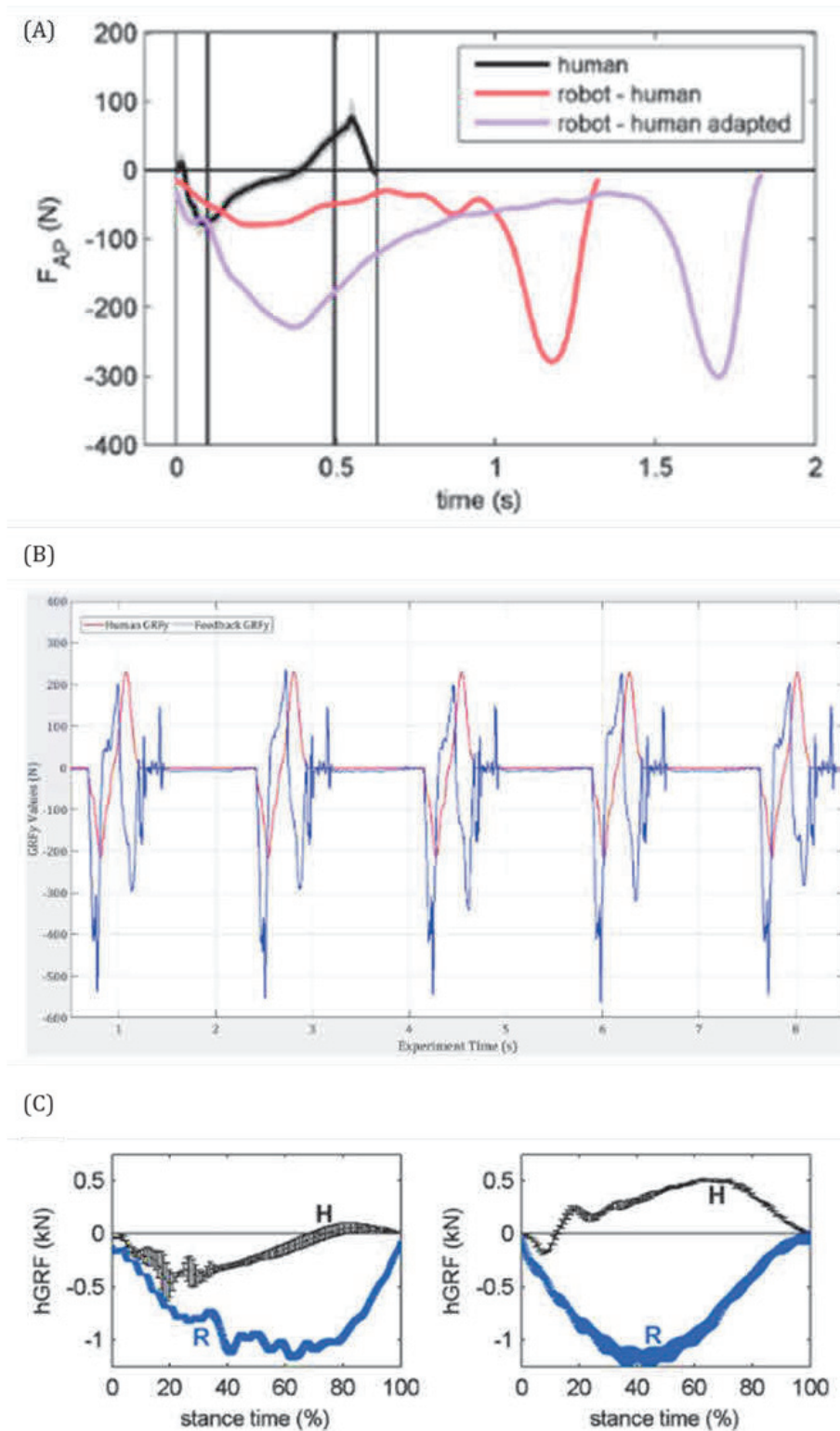


Figure 50 : Forces de réaction antéro-postérieure pour (A), les travaux de Jones (2014) portant sur la simulation mécanique de la marche à 5 km/h (avec en noir la courbe de référence d'un testeur humain) pour (B), les travaux de Nguyen (2017) portant sur la simulation mécanique de la course à 12 km/h (avec en bleu la courbe de référence d'un testeur humain) et pour (C), les travaux de Ronkainen et al. (2010) portant sur la simulation mécanique de la course (avec en noir la courbe de référence d'un testeur humain) pour une attaque talon (figure de gauche) et une attaque avant-pied (figure de droite).

Chapitre 6 : Conclusion

6.1. Principaux résultats

L'objectif général de cette thèse était de développer une méthode expérimentale d'usure de chaussures par le biais de la mise au point d'une machine de test des produits chaussants reproduisant au mieux les interactions chaussure/sol au cours de la phase d'appuis. Les travaux présentés dans les chapitres précédents forment un ensemble permettant d'atteindre cet objectif en répondant aux trois questions de recherche présentées dans le Chapitre 1 : Introduction.

6.1.1. Question 1

« Que signifie une usure "réaliste" de chaussure et comment l'obtenir ? »

Cette première question de recherche est abordée dans le Chapitre 2 : Expérimentation d'usure « au porté » et le Chapitre 3 : Partie 3.1. Revue de littérature sur les simulateurs existants. L'ensemble des informations recueillies est utilisé pour répondre aux deux questions de recherche suivantes. Un test d'usure « au porté » a été réalisé afin de quantifier les conséquences du vieillissement d'une chaussure de ville (du type « sneakers ») sur ses propriétés mécaniques et sur la biomécanique de la marche. A l'aide de ce test, nous avons pu ainsi évaluer l'usure des chaussures au cours de l'usage mais également quantifier la faisabilité d'une telle expérience. Nous avons pu créer une base de données de variables biomécaniques décrivant l'interaction pied/sol pour de la marche à 3 et 5 km/h à différents stades d'usure des chaussures. Afin de recréer cette même usure, sans pour autant passer par l'utilisation de testeurs humains lors de tests « au porté », un recensement de l'existant en termes de machine et méthodes de test par le biais de la littérature scientifique, de la littérature grise (brevet, etc.) et de l'analyse des solutions proposées sur les sites web a été mené à bien sous la forme d'une revue de littérature soumise au journal : Sports Engineering and Technology. Nous avons ainsi pu voir que les tests mécaniques existants ne permettent pas encore de générer des interactions pieds-sol bio-fidèles et qu'aucune étude ne produit de résultats quantifiés sur des tests d'usure de chaussures impliquant un grand nombre de cycle.

6.1.2. Question 2

« Comment piloter une machine de test afin de reproduire des interactions chaussure/sol bio-fidèles ? »

Cette seconde question de recherche est abordée dans le Chapitre 3 : Partie 3.2. Simulateur mécanique de CTC et dans le Chapitre 5 : Génération de trajectoires de pilotage du simulateur mécanique et s'aide des résultats obtenus pour répondre à la première question de recherche. L'ensemble des informations recueillies est utilisé pour répondre à la troisième question de recherche. Une première phase de mise au point, avec des évolutions mécaniques, a permis de passer d'un prototype de machine à un simulateur de marche et de course à pied opérationnel. Cette démarche a occupé un temps relativement long de cette thèse mais n'est pas décrite dans ce document. Afin d'apprendre à piloter ce simulateur mécanique, dont les caractéristiques sont éloignées de l'anatomie humaine en termes de degrés de liberté et d'actionneurs, un modèle cinématique de la partie supérieure de la machine a été proposé tandis qu'une caractérisation des éléments compliantes de la partie inférieure de la machine a été réalisée. Ces travaux ont permis de mieux comprendre l'influence du pilotage de certains actionneurs du simulateur mécanique sur la reproduction des interactions chaussure/sol. Par la suite, une méthode de génération de trajectoires de pilotage du simulateur mécanique tenant compte de certaines variables biomécaniques issues de tests « au porté » avec des testeurs humains a été mise en place et testée afin d'essayer de simuler mécaniquement différentes allures de marche, voire de course à pied, et différentes attaques du pied sur le sol. Cette approche pourrait évidemment être améliorée mais elle a notamment permis de générer des trajectoires de course à 14 km/h beaucoup plus représentative en termes de temps de contact et d'efforts de réaction que ce qui a été décrit dans la littérature.

6.1.3. Question 3

« Est-il possible de réaliser un test d'usure complet sur un simulateur mécanique ? »

Cette troisième question de recherche est abordée dans le Chapitre 4 : Tests de simulation mécanique d'usure pour une activité de marche et utilise une partie des résultats obtenus pour répondre aux deux premières questions de recherche. Une simulation mécanique d'usure simulant une activité de marche a ainsi pu être réalisée permettant de montrer la faisabilité d'un test sur cette machine pendant plus 150 000 cycles. Cela a permis d'évaluer les caractéristiques de la simulation elle-même (durée de l'essai, fiabilité de la machine, etc.) et de ses résultats (bio-fidélité, usure de la semelle,

etc.). En effet, le temps mis par le simulateur mécanique pour user une chaussure sur le même nombre de cycles que les testeurs humains est presque 4 fois plus rapide. La répétabilité du simulateur mécanique est supérieure à celle des testeurs humains mais sa fiabilité reste quant à elle à améliorer afin notamment de limiter les arrêts intempestifs de la machine. La bio-fidélité de l'interaction chaussure/sol de la simulation mécanique reste encore à améliorer avec notamment le besoin d'atteindre des amplitudes de force et d'angle plus proches de celles observées chez l'humain. L'usure réalisée par le test se retrouve uniquement au niveau de la semelle de la chaussure et les méthodes présentées pour quantifier cette usure restent mitigées car bien trop subjectives. Ce test reste une première et les résultats obtenus lorsque la chaussure est à l'état neuf semble aussi bon voire meilleur que ce que nous avons pu observer dans la littérature.

6.2. Perspectives de recherche

A l'issu de cette thèse nous avons pu atteindre une grande partie des objectifs initialement fixés. Il reste néanmoins de nombreuses questions et pistes de recherche qui n'ont pas pu être abordées au cours de la thèse ou qui ont été soulevées par les résultats obtenus.

6.2.1. Compléter les tests d'usure

On constate que le simulateur mécanique est certes capable de réaliser de l'usure au niveau de la chaussure (uniquement au niveau de la semelle) mais la validation de cette dernière reste complexe à réaliser. En effet, pour valider cette usure produite par le test de simulation mécanique nous nous sommes basés sur celle réalisée par les testeurs humains durant le test d'usure « au porté ». Une des limites de ce test d'usure « au porté » est sa durée et par conséquent l'intensité de l'usure relevée au niveau des chaussures. A la fin du test « au porté », nous n'avons pas observé de dégradation visuelle importante de la chaussure comme nous pouvons le voir lors de tests réalisés en laboratoire physique (déchirures, décollements, abrasions, etc.). Il est fort possible que la durée des 60 jours d'utilisation n'ait pas été assez importante afin de réellement dégrader le produit chaussant (notamment la tige de la chaussure). De manière similaire, nous n'observons pas de dégradation importante de la chaussure au bout de plus de 170 000 cycles d'usure sur le simulateur mécanique. Il serait par conséquent intéressant de mener à bien une expérience d'usure « au porté », avec des testeurs humains, plus longue qui permettrait d'obtenir potentiellement une réelle dégradation du produit chaussant. Il serait aussi possible de coupler à cela l'utilisation d'une chaussure avec une construction et des matériaux plus fragiles afin d'obtenir une dégradation plus importante ou plus rapide dans le temps. Ces résultats pourraient ainsi être transférés sur le simulateur mécanique dans le but de réaliser un nombre de cycles bien plus importants que ce que nous avons réalisé précédemment. Cela pourrait permettre d'améliorer la méthode de prise photo et ainsi de créer une véritable échelle visuelle du niveau de dégradation de la chaussure. De même, il serait également bien de coupler à cette méthode de prise de photo, une batterie de tests physiques unitaires indépendants du simulateur mécanique afin de quantifier de

manière objective l'usure de la chaussure. En effet, des tests physiques avaient été réalisés durant les tests d'usure « au porté » (test de souplesse longitudinale et test de coefficient de transfert du talon) et ces derniers avaient montré une diminution significative de l'absorption des chocs au niveau du talon et de la résistance en flexion des 30 jours d'utilisation par rapport au test initial (chaussure neuve). Il serait par conséquent intéressant de réaliser ces mêmes tests durant la simulation mécanique d'usure. La validation de l'usure des chaussures pourrait ainsi suivre une méthode mixte utilisant des données subjectives (prise de photos) et objectives (tests physiques unitaires).

6.2.2. Améliorer le pilotage du simulateur

Au niveau du pilotage du simulateur mécanique, nous avons pu voir que l'utilisation du modèle de génération de trajectoires a permis de créer différentes simulations mécaniques de marche et de course à pied. Cependant, la bio-fidélité des simulations reste à améliorer. En effet, dans ce modèle nous n'avons étudié que des hypothèses de contrôle de la vitesse d'un point fixe dans un pied supposé rigide. Afin de mieux reproduire les interactions chaussure/sol et les déformations de la chaussure, il serait important de travailler sur la cinématique du mouvement du pied durant la phase d'appui avec l'ajout de variable comme la flexion de l'articulation métatarso-phalangienne pouvant jouer sur l'usure de la tige de la chaussure. De même, il serait intéressant de travailler sur la cinématique avant et après cette phase d'appui par le biais des vitesses relatives du pied avec le sol pouvant notamment impacter la force de réaction du sol suivant l'axe antéro-postérieur. A l'heure actuelle, le pilotage du simulateur mécanique est « simple » (hypothèse d'un pied indéformable) mais permet déjà de reproduire certaines caractéristiques de la marche humaine.

6.2.3. Améliorer et caractériser l'effecteur final

Une amélioration du pilotage du simulateur pourrait être l'ajout de degré de liberté supplémentaire avec l'ajout d'actionneurs au niveau du pied pouvant alors le rendre actif. Cela permettrait d'obtenir une cinématique du pied semblable à la réalité qui par conséquent devrait améliorer la bio-fidélité de la simulation mécanique.

Concernant l'effecteur final actuel, une caractérisation de la compliance plus poussée doit être réalisée afin de comprendre les différentes possibilités de relier l'instant d'attaque du pied à l'instant de décollage des orteils en passant par la phase où le pied est à plat sur le sol. Dans l'objectif de simuler l'usure des chaussures, il faudrait également créer un test de quantification de l'usure de l'effecteur final afin de s'assurer que durant la simulation mécanique ce soit bien la chaussure que nous usons et pas l'effecteur final. Ce test pourrait par exemple être réalisé sur les mêmes machines utilisées lors de tests physiques permettant d'user les chaussures (banc d'essai mécanique de fatigue, MTS Systems Corp, Minneapolis, MN). L'usure étant un phénomène multifactoriel, une piste d'amélioration de l'effecteur final serait de jouer sur les volumes du pied afin de solliciter plus ou moins certaines zones de la chaussure et aussi pourquoi pas d'ajouter un paramètre physiologique comme la transpiration.

6.2.4. Caractériser le lien entre la bio-fidélité de la trajectoire de pilotage et l'usure

Pour finir, l'une des hypothèses des simulateurs mécaniques essayant de reproduire la phase de contact du pied avec le sol est de partir du principe que plus la simulation mécanique est proche de la réalité (cinématique comme dynamique) meilleure sera l'usure de la chaussure. Afin de valider cette hypothèse, il serait intéressant de réaliser plus de test de simulation mécanique de marche et de course dans des conditions différentes afin de voir l'usure engendrée. En effet, pour l'instant chaque simulateur mécanique estime qu'un cycle machine (une reproduction de la phase d'appui) équivaut à un pas dans la réalité mais il est possible que ce ne soit pas le cas et que certaines machines usent plus ou moins rapidement les chaussures.

Bibliographie

- Bartlett, R., Wheat, J., & Robins, M. (2007). Is movement variability important for sports biomechanists? *Sports Biomechanics*, 6(2), 224–243.
<https://doi.org/10.1080/14763140701322994>
- Bates, B. T., Osternig, L. R., Sawhill, J. A., & James, S. L. (1983). An assessment of subject variability, subject-shoe interaction, and the evaluation of running shoes using ground reaction force data. *Journal of Biomechanics*, 16(3), 181–191.
[https://doi.org/10.1016/0021-9290\(83\)90125-2](https://doi.org/10.1016/0021-9290(83)90125-2)
- Chambon, N., SEVREZ, V., Ly, Q. H., Guéguen, N., Berton, E., & Rao, G. (2014). Aging of running shoes and its effect on mechanical and biomechanical variables: Implications for runners. *Journal of Sports Sciences*, 32(11), 1013–1022.
<https://doi.org/10.1080/02640414.2014.886127>
- Commission Decision (EU) 2016/1349 of 5 August 2016 establishing the ecological criteria for the award of the EU Ecolabel for footwear (notified under document C(2016) 5028) (Text with EEA relevance), 214 OJ L (2016).
<http://data.europa.eu/eli/dec/2016/1349/oj/eng>
- Cook, S. D., Kester, M. A., & Brunet, M. E. (1985). Shock absorption characteristics of running shoes. *The American Journal of Sports Medicine*, 13(4), 248–253.
<https://doi.org/10.1177/036354658501300406>
- Cornwall, M. W., & McPoil, T. G. (2017). CAN RUNNERS PERCEIVE CHANGES IN HEEL CUSHIONING AS THE SHOE AGES WITH INCREASED MILEAGE? *International Journal of Sports Physical Therapy*, 12(4), 616–624.

- Hansen, A. H., Childress, D. S., & Knox, E. H. (2004). Roll-over shapes of human locomotor systems: Effects of walking speed. *Clinical Biomechanics*, 19(4), 407–414. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2003.12.001>
- Hansen, A. H., Meier, M. R., Sam, M., Childress, D. S., & Edwards, M. L. (2003). Alignment of trans-tibial prostheses based on roll-over shape principles. *Prosthetics and Orthotics International*, 27(2), 89–99. <https://doi.org/10.1080/03093640308726664>
- Heidenfelder, J., Sterzing, T., & Milani, T. L. (2009). Biomechanical wear testing of running shoes. *Footwear Science*, 1(sup1), 16–17. <https://doi.org/10.1080/19424280902977046>
- Herbaut, A., Chavet, P., Roux, M., Guéguen, N., Barbier, F., & Simoneau-Buessinger, E. (2017). The influence of shoe aging on children running biomechanics. *Gait & Posture*, 56, 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.05.011>
- Jafarnezhadgero, A. A., Anvari, M., & Granacher, U. (2020). Long-term effects of shoe mileage on ground reaction forces and lower limb muscle activities during walking in individuals with genu varus. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 73, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2020.01.006>
- Jafarnezhadgero, A. A., Yadegar, A., Valizadehorang, A., & Dionisio, V. C. (2021). Effect of sports shoe mileage on running mechanics and lower limb muscular activities in male individuals with and without genu varus. *Science & Sports*, 36(5), e175–e183. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2020.10.010>
- Jones, J. A. (2014). *The potential for emulating the human footstrike using a Six Degrees-of-Freedom industrial robot* [Thesis, Loughborough University]. [/articles/thesis/The_potential_for_emulating_the_human_footstrike_using_a_Six_Degrees-of-Freedom_industrial_robot/9544532/1](https://doi.org/10.1016/j.scispo.2020.10.010)

- Kong, P. W., Candelaria, N. G., & Smith, D. R. (2009). Running in new and worn shoes: A comparison of three types of cushioning footwear. *British Journal of Sports Medicine*, 43(10), 745–749. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2008.047761>
- Lee, J.-N. (2009). Study on Measuring Mechanical Properties of Sport Shoes Using an Industrial Robot. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 10(12), 3833–3838. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.12.3833>
- Lee, J.-N., Son, Y.-D., & Lee, D.-J. (2004). Development of a Multi-purpose Test Device for Measuring Mechanical Properties of Shoes. *제어로봇시스템학회:학술대회논문집*, 726–729.
- Lewis, G. (2005). *Force-Control for the Automated Footwear Testing System* [Study Group Report]. <http://miis.maths.ox.ac.uk/miis/193/>
- Lippa, N., Bonacci, J., Collins, P. K., Rawlins, J. W., & Gould, T. E. (2019). Effect of mechanically aged minimalist and traditional footwear on female running biomechanics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 233(3), 375–388. <https://doi.org/10.1177/1754337118824001>
- Mara, G. E. (2007). *Boundary conditions for the virtual testing of athletic footwear* [Ph.D., Loughborough University]. <https://hdl.handle.net/2134/13143>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & Group, T. P. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLOS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Monckton, S. P., & Chrystall, K. (2002). Design and development of an automated footwear testing system. *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*, 4, 3684–3689 vol.4. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1014282>

- Munn, Z., Peters, M. D. J., Stern, C., Tufanaru, C., McArthur, A., & Aromataris, E. (2018). Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. *BMC Medical Research Methodology*, *18*(1), 143. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x>
- Nguyen, T. L. (2017). *Development of a robotic running foot for footwear testing* [Thesis]. <https://dr.ntu.edu.sg/handle/10356/72697>
- Odenwald, S. (2006). Test methods in the development of sports equipment. In *The engineering of sport 6* (pp. 301–306). Springer.
- Peters, M. D. J., Godfrey, C. M., Khalil, H., McInerney, P., Parker, D., & Soares, C. B. (2015). Guidance for conducting systematic scoping reviews. *JBI Evidence Implementation*, *13*(3), 141–146. <https://doi.org/10.1097/XEB.0000000000000050>
- Preatoni, E., Hamill, J., Harrison, A. J., Hayes, K., Van Emmerik, R. E. A., Wilson, C., & Rodano, R. (2013). Movement variability and skills monitoring in sports. *Sports Biomechanics*, *12*(2), 69–92. <https://doi.org/10.1080/14763141.2012.738700>
- Ronkainen, J. A., El-Kati, R. F., Fleming, P. R., & Forrester, S. E. (2010). Application of an industrial robot in the sports domain: Simulating the ground contact phase of running. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, *224*(4), 259–269. <https://doi.org/10.1243/17543371JSET59>
- Starker, F., Blab, F., Dennerlein, F., & Schneider, U. (2014). A method for sports shoe machinery endurance testing: Modification of ISO 22675 prosthetic foot test machine for heel-to-toe running movement. *Procedia Engineering*, *72*, 405–410.
- Verdejo, R., & Mills, N. J. (2004). Simulating the effects of long distance running on shoe midsole foam. *Polymer Testing*, *23*(5), 567–574. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2003.11.005>

Zmitrewicz, R. J., Neptune, R. R., Walden, J. G., Rogers, W. E., & Bosker, G. W. (2006). The Effect of Foot and Ankle Prosthetic Components on Braking and Propulsive Impulses During Transtibial Amputee Gait. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *87*(10), 1334–1339. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2006.06.013>