

Analyse des paramètres spatio-temporels de la marche
sur un tapis roulant instrumenté à deux voies à vitesse
fixe et en mode haptique chez le sujet valide

par

Mohamed Amir CHITOUR

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE CONCENTRATION TECHNOLOGIES DE LA SANTÉ
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 10 MAI 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Rachid Aissaoui, directeur de mémoire

Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. David Labbé, président du jury

Département de génie logiciel et des technologies de l'information à l'École de technologie supérieure

Mme Sylvie Nadeau, jury externe

École de réadaptation, Université de Montréal

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 10 AVRIL 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce travail scientifique a été réalisé au sein du Laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie (LIO) du Centre de Recherche du Centre Hospitalier Universitaire de Montréal (CRCHUM) sous la direction du professeur Rachid Aissaoui.

Je remercie, Monsieur le Professeur Rachid Aissaoui qui m'a enseigné par-dessus tout, la rigueur scientifique et la méthodologie me permettant de m'initier à la recherche dans un domaine pluridisciplinaire alliant le génie à la science de la vie.

Monsieur le Professeur David Labbé a bien voulu accepter la présidence du jury qu'il en soit grandement remercié.

Mes remerciements vont aussi à la Professeure Sylvie Nadeau qui a accepté de faire partie du jury.

J'ai aussi beaucoup de reconnaissance à l'égard du Professeur Jacques A. De Guise de m'avoir permis d'intégrer et de faire mes premières armes au sein du LIO.

Je remercie également le Professeur Hakim Bouzid qui a guidé mes premiers pas et m'a conseillé dans le choix de la spécialité en fonction de mon parcours initial de médecin.

Je ne peux terminer sans associer dans mes remerciements les chevilles ouvrières du laboratoire : Gerald, Thomas, Caroline et Marie que j'ai souvent sollicités. Ils m'ont toujours répondu avec patience et abnégation.

Enfin, je pense à mes collègues du laboratoire, ce bouillon de culture que notre professeur a su créer par une émulation créatrice : Xavier, Philippe, Ali, Sarra, Maria, Rodrigue, Théo et Aiman se reconnaîtront pour la convivialité et les discussions si profitables que nous avons eues.

Mohamed Amir Chitour

DÉDICACE

A mes parents avec mon affection

A ma sœur Houda, Samir, Jad et Jena

A Amina

“Mon pied droit est jaloux de mon pied gauche. Quand l'un avance, l'autre veut le dépasser.

Et moi, comme un imbécile, je marche !”

De Raymond Devos

Analyse des paramètres spatio-temporels de la marche sur un tapis roulant instrumenté à deux voies à vitesse fixe et en mode haptique chez le sujet valide

Mohamed Amir CHITOUR

RÉSUMÉ

OBJECTIF : L'objectif principal de notre étude de recherche est d'évaluer la capacité du tapis roulant à deux voies à générer une marche dite « naturelle » lorsque celui-ci fonctionne en mode haptique. Pour cela, nous avons comparé trois conditions de marche à savoir : la marche au sol (SOL), celle sur le tapis roulant à vitesse fixe (VF) et enfin celle en mode haptique (MH).

MÉTHODE : L'expérimentation a porté sur 15 participants sains au cours de laquelle nous avons évalué quatre paramètres spatio-temporels de la marche (la longueur de pas, la longueur de foulée, la cadence et la vitesse de marche) ainsi que leur variabilité. Un système de 19 capteurs inertiels (MVN Biomech ; XSens, Inc.) a été utilisé dans trois conditions de marche : la marche naturelle le long d'un couloir, la marche sur tapis roulant à vitesse fixe et enfin la marche sur un tapis roulant en mode haptique. Après avoir réalisé les acquisitions, un traitement de données a été effectué faisant suite à une correction des données qui avait concerné les participants qui présentaient le plus de variabilité et donc le moins de contrôle par la même occasion du tapis en mode haptique. Nous nous sommes d'ailleurs limités à huit participants et pris comme situation de référence de la variabilité de la marche : le CV (coefficient de variation) de la longueur de pas allant de 10 à 25 %. S'en est suivie une correction des trois autres paramètres cités plus haut prenant toujours comme situation de référence la variabilité de la longueur de pas.

RÉSULTATS : Une analyse statistique de type ANOVA a été réalisée sur les CV des quatre paramètres spatio-temporels. Pour tous les paramètres, les CV dans la condition VF sont significativement plus faibles que dans la condition SOL. En revanche, il n'y a pas de différence significative entre les conditions SOL et MH pour la longueur de pas et la cadence. Les valeurs des CV pour ces deux paramètres dans les conditions VF, SOL et MH : ($3,0 \pm 0,6$ %), ($5,0 \pm 1,7$ %) et ($7,4 \pm 3$ %) pour la longueur de pas, et ($1,5 \pm 0,2$ %), ($2,6 \pm 1,2$ %) et ($3,2 \pm 1,0$ %) pour la cadence.

CONCLUSION : La variabilité de la marche sur le tapis en MH se rapprochait plus de celle du couloir (SOL) que du tapis à VF s'agissant de la longueur de pas et de la cadence. D'autres améliorations sur le modèle haptique actuel implémenté sur le tapis doivent être apportées nécessitant des ajustements de l'algorithme pour des résultats plus homogènes afin que la variabilité de la marche en MH se rapproche encore plus de celle mesurée le long du couloir pour un plus grand nombre de participants.

Mots-clés : tapis roulant, marche, paramètres spatio-temporels, variabilité de la marche, mode haptique.

Analysis of Spatio-Temporal Parameters during Gait on a Double Belt Instrumented Treadmill in Fixed Speed and Haptic Mode in Healthy Adults

Mohamed Amir CHITOUR

ABSTRACT

OBJECTIVE: The main objective of this research study is to evaluate the ability of a split-belt treadmill, working under a haptic mode, to generate a normal gait. For this purpose, we compared three different gait conditions: overground walking in a corridor, walking on a treadmill at fixed speed and finally walking on a haptic treadmill.

METHOD: 15 healthy participants took part in this study in which different gait were measured namely: (step length, stride length, cadence and walking speed.). The variability of each parameters was assessed using the coefficient of variation (CV). An MVN Biomech; XSens, Inc system with 19 inertial sensors was used to measure 3D kinematics in three gait conditions: normal walking gait along a corridor, walking on a treadmill under a fixed speed mode and walking on a treadmill in a haptic mode. As a result, data was processed and an adjustment was carried out for the participants presenting high variability using a simple data smoothing technique. This concerned eight participants for whom the coefficient of variation (CV) of the step length ranged between 10 and 25%. As a consequence, the three remaining spatio-temporal parameters were adjusted by considering the CV of the step length as a reference.

RESULTS: A statistical analysis ANOVA was performed on the overall CVs and average values of the four spatio-temporal parameters. The CVs under the fixed speed mode are significantly lower than the ones measured in overground walking condition. Moreover, there was no significant difference between overground and haptic mode conditions regarding the step length and the cadence. The values of the CVs for both parameters under the three conditions were $3,0 \pm 0,6 \%$ for fixed speed, $5,0 \pm 1,7 \%$ for overground walking and $7,4 \pm 3 \%$ for haptic mode for the step length, and $(1,5 \pm 0,2 \%)$, $(2,6 \pm 1,2 \%)$ and $(3,2 \pm 1,0 \%)$ for the cadence respectively.

CONCLUSION: These results lead us to confirm that the behaviour of walking under a haptic mode is closer to the one observed along the corridor compared to the fixed speed mode. Further improvements need to be carried out to enhance the treadmill's haptic operating mode such that the gait variability under this latter is closer to the one along the corridor for more participants.

Keywords: Treadmill, walk, spatio-temporal parameters, gait variability, self-paced mode, haptic mode.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART DE LA BIOMÉCANIQUE DE LA LOCOMOTION SUR TAPIS ROULANT À DEUX COURROIES ET LA MARCHÉ SUR CORRIDOR CHEZ LE SUJET SAIN.....	3
1.1 Biomécanique et outils de capture de la marche humaine.....	3
1.1.1 La standardisation du cycle de la marche normale	3
1.1.1.1 Décomposition du cycle de la marche	4
1.1.2 Les caractéristiques spatio-temporelles de la marche.....	4
1.1.2.1 Les paramètres spatiaux.....	4
1.1.2.2 Les paramètres temporels	5
1.1.3 Capture et analyse du mouvement.....	5
1.1.3.1 Principe de fonctionnement du système de capture VICON du tapis roulant AMTI à deux voies	5
1.1.3.2 Principe de fonctionnement du système de capture Xsens du LIO	6
1.2 Revue de littérature	7
1.2.1 Évaluation des paramètres spatio-temporels lors de la marche le long d'un couloir	8
1.2.2 Évaluation des paramètres spatio-temporels lors de la marche le long d'un corridor comparativement à la marche sur tapis à vitesse fixe	10
1.2.3 Évaluation des paramètres spatio-temporels lors de la marche sur le tapis roulant à vitesse fixe comparativement à la marche sur tapis en mode « Self Paced »	14
1.2.4 Évaluation des paramètres spatio-temporels lors de la marche sur le tapis roulant en mode haptique comparativement à la marche le long d'un couloir	15
1.2.5 Évaluation des paramètres spatio-temporels lors de la marche sur un tapis roulant à vitesse fixe	17
1.2.6 Synthèse des expérimentations passées	23
1.2.7 Énoncé de l'hypothèse de recherche	30
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	31
2.1 Les participants	32
2.1.1 Le recrutement.....	32
2.1.2 Les critères d'inclusion et d'exclusion des participants	33
2.1.2.1 Les critères d'inclusion.....	33
2.1.2.2 Les critères d'exclusion.....	33
2.1.3 Soumission des formulaires d'information et de consentement du protocole	34
2.2 Le déroulement expérimental	34

2.2.1	Marche le long d'un couloir	34
2.2.1.1	Habillage du participant et positionnement des capteurs inertiels du Xsens	35
2.2.1.2	Calibration du système X sens	36
2.2.1.3	Vérification rapide des données acquises sur corridor	36
2.2.2	Marche sur tapis roulant AMTI à deux voies	38
2.2.2.1	Positionnement des marqueurs de capture de mouvement VICON	38
2.2.2.2	Probage anatomique des segments articulaires du corps entier	38
2.2.2.3	Échauffement et choix de la vitesse de marche de confort	39
2.2.2.4	Exercices de marche sur tapis roulant AMTI à deux voies à vitesse fixe	39
2.2.2.5	Exercices de marche sur tapis roulant AMTI à deux voies en mode haptique	40
2.2.2.6	Soumission des questionnaires qualitatifs sur la marche le long du couloir VS marche sur un tapis roulant à la fin de l'expérimentation	40
2.3	Analyse statistique des paramètres spatio-temporels mesurés	40
2.4	Correction des perturbations survenu lors des acquisitions en mode haptique	41
CHAPITRE 3	RÉSULTATS	43
3.1	Les paramètres spatiaux	43
3.1.1	Mesure de la longueur de pas droit et gauche par le système de capteurs inertiels (X sens) dans les trois conditions de marche	43
3.1.1.1	Mesure de la moyenne de la longueur de pas droit et gauche ...	43
3.1.1.2	ANOVA de la moyenne des longueurs de pas droit et gauche dans trois conditions de marche après correction des perturbations des données en mode haptique :	44
3.1.1.3	Mesure du CV de la longueur de pas droit et gauche dans les trois conditions de marche :	45
3.1.1.4	ANOVA du coefficient de variation des longueurs de pas droit et gauche	45
3.1.1.5	Correction des perturbations en mode haptique des huit participants les plus variables concernant la longueur de pas droit et gauche	46
3.1.2	Mesure de la longueur de foulée par le système de capteurs inertiels (X sens) dans les 3 conditions de marche	48
3.1.2.1	Mesure de la moyenne de la longueur de foulée	48
3.1.2.2	ANOVA de la moyenne des longueurs de foulée après correction des perturbations des données en mode haptique	49
3.1.2.3	Mesure du CV de la longueur de foulée	49
3.1.2.4	ANOVA du CV de la foulée	50
3.1.2.5	Correction des perturbations en mode haptique des huit participants les plus variables concernant la longueur de foulée	50
3.2	Les paramètres temporels	52
3.2.1	Mesure de la cadence par le système de capteurs inertiels (Xsens) dans les 3 conditions de marche	52
3.2.1.1	Mesure de la moyenne de la cadence	52

3.2.1.2	ANOVA de la moyenne de la cadence de marche et du CV dans trois conditions après correction des perturbations en mode haptique.....	53
3.2.1.3	Mesure du CV de la cadence de marche	53
3.2.1.4	ANOVA du coefficient de variation de la cadence de marche après correction des perturbations en mode haptique	54
3.2.1.5	Correction des perturbations en mode haptique des huit participants les plus variables concernant la cadence	54
3.2.2	Mesure de la vitesse de marche par le système de capteurs inertiels (Xsens) dans les trois conditions de marche	56
3.2.2.1	Mesure de la moyenne de la vitesse de marche dans les trois conditions de marche	56
3.2.2.2	ANOVA de la moyenne de la vitesse de marche	56
3.2.2.3	Mesure du Coefficient de variation de la vitesse de marche	57
3.2.2.4	ANOVA du coefficient de variation de la vitesse de marche	57
3.2.2.5	Correction des perturbations en mode haptique des huit participants les plus variables concernant la vitesse de marche	58
3.3	Résultat du questionnaire qualitatif sur la marche dans les trois conditions de marche	59
3.4	Calcul de la moyenne quadratique moyenne (RMS) de la longueur de pas droite et gauche mesurée par le Vicon et le système inertiel X sens sur tapis roulant en mode vitesse fixe et haptique	60
CHAPITRE 4	DISCUSSION	63
4.1	Analyse des paramètres spatio-temporels de la marche	63
4.2	Analyse statistique des paramètres spatio-temporels de la marche en ayant recours à l'analyse de variance (ANOVA).....	65
4.3	Interprétation des résultats du questionnaire qualitatif dans les trois conditions de marche	68
4.4	Limites de notre étude	69
CONCLUSION.....		71
RECOMMANDATIONS		73
ANNEXE I	Tableaux illustrant les moyennes, les écarts-types et les CV des variables spatio-temporelles avant et après correction des perturbations en mode haptique.....	75
ANNEXE II	Protocole d'acquisition.....	89
ANNEXE III	Formulaire d'information et de consentement.....	95
ANNEXE IV	Questionnaire qualitatif sur la marche sur corridor vs marche sur tapis roulant.....	109
CONTRIBUTIONS.....		113
BIBLIOGRAPHIE.....		115

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Synthèse de la revue de littérature.....24
Tableau 2.1	Caractéristiques anthropométriques chez les femmes 32
Tableau 2.2	Caractéristiques anthropométriques chez les hommes 33
Tableau 2.3	Moyenne de la vitesse le long du couloir et sur tapis roulant à vitesse fixe chez les femmes 37
Tableau 2.4	Moyenne de la vitesse le long du couloir et sur tapis roulant à vitesse fixe chez les hommes 38
Tableau 3.1	ANOVA des moyennes des longueurs de pas droits et gauches dans les trois conditions de marche 45
Tableau 3.2	ANOVA des CV des longueurs de pas droits et gauches dans les trois conditions de marche..... 44
Tableau 3.3	ANOVA des moyennes des longueurs de foulées dans les trois conditions de marche 51
Tableau 3.4	ANOVA des CV des longueurs de foulées dans les trois conditions de marche 53
Tableau 3.5	ANOVA des moyennes de la cadence dans les trois conditions de marche 49
Tableau 3.6	ANOVA des CV de la cadence dans les trois conditions de marche..... 51
Tableau 3.7	ANOVA des moyennes de la vitesse de marche dans les trois conditions de marche..... 50
Tableau 3.8	ANOVA des CV de la vitesse de marche dans les trois conditions de marche 61
Tableau 3.9	Scores ainsi que les médianes, obtenus pour chaque question posée aux participants..... 63
Tableau 3.10	Concordance de mesure (VICON vs Xsens) de la longueur de pas droite et gauche 65

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Décomposition du cycle de la marche 3
Figure 1.2	Caractéristiques spatiaux du cycle de la marche 5
Figure 1.3	Tapis roulant AMTI à double voie ainsi que le système de caméra Vicon du LIO (CRCHUM)..... 6
Figure 1.4	Variabilité de la durée de cycle chez la personne âgée avec et sans risque potentiel de chute..... 21
Figure 2.1	Participante dotée du système de capteurs inertiels, des plaques dotées de marqueurs réfléchissants ainsi que du harnais de sécurité 36
Figure 3.1	Moyenne de longueurs de pas droits et gauches dans trois conditions de marche des 15 participants..... 43
Figure 3.2	CV de la longueur de pas droit et gauche dans les trois conditions de marche considéré du moins au plus variable en mode haptique..... 45
Figure 3.3	Évolution du CV de la longueur de pas droit et gauche sur le tapis avant et après correction des perturbations en mode haptique des huit participants..... 46
Figure 3.4	Longueurs de pas droits avant et après correction des perturbations en mode haptique chez le participant 1 49
Figure 3.5	Longueurs de pas gauches avant et après correction des perturbations en mode haptique chez le participant 1 47
Figure 3.6	Moyenne des longueurs de foulée dans trois conditions de marche des 15 participants 48
Figure 3.7	Évolution du coefficient de variation de la longueur de foulée dans les trois conditions de marche du moins au plus variable en se basant sur variabilité de la longueur de pas en mode haptique 49
Figure 3.8	Évolution du CV de la longueur de foulée sur le tapis avant et après correction des perturbations en mode haptique de 8 participants 51
Figure 3.9	Longueurs de foulée avant et après correction des perturbations en mode haptique chez le participant 1 51

Figure 3.10	Moyenne de la cadence des 15 participants dans 3 conditions de marche 52
Figure 3.11	Évolution du CV de la cadence dans trois conditions de marche..... 53
Figure 3.12	CV de la Cadence avant et après correction des perturbations en mode haptique chez les huit participants les plus variables 55
Figure 3.13	Cadence avant et après correction des perturbations en mode haptique chez le participant 1 55
Figure 3.14	Moyenne de la vitesse de marche des 15 participants dans les trois conditions de marche 59
Figure 3.15	CV de la vitesse dans les trois conditions de marche considérée du moins au plus variable en mode haptique 57
Figure 3.16	CV de la vitesse de marche avant et après correction des perturbations en mode haptique concernant les 8 participants les plus variables 58
Figure 3.17	Vitesse de marche avant et après correction des perturbations en mode haptique chez le participant 1 59

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AMTI	Advanced Mechanical Technology, Inc.
ANOVA	Analyse of variance
AVC	Accident vasculaire cérébral
COP	Center of pressure (centre de pression)
CV	Coefficient de variation
CHUM	Centre hospitalier universitaire de Montréal
CRCHUM	Centre de recherche du centre hospitalier universitaire de Montréal
ÉTS	École de Technologie supérieure de Montréal
FRS	Force de réaction au sol
GVI	Gait Variability Index
IVERT	Integrated virtual environment rehabilitation treadmill
LIO	Laboratoire d'Imagerie et Orthopédie

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

S	seconde
M	mètre
V	vitesse = m/s
Lp	longueur de pas
Lf	longueur de foulée
C	Cadence
Cm	Centimètre
D	Droit
G	Gauche

INTRODUCTION

La marche est le mode de locomotion le plus fréquemment utilisé par l'homme afin de se déplacer. La diminution de la mobilité suite à une pathologie entraîne le plus souvent une diminution des capacités fonctionnelles et par conséquent un isolement de la vie sociale. C'est pourquoi la rééducation de la marche fait l'objet d'une attention toute particulière de la part du physiothérapeute.

L'évaluation clinique de la marche normale et de ses anomalies basées seulement sur l'examen visuel est très limitée. En effet, la marche est une activité très complexe et trop rapide pour pouvoir être analysée en détail sans l'assistance de moyens de mesures sophistiqués. Le développement des nouvelles technologies a permis d'introduire de nombreuses techniques d'analyse de la marche en milieu clinique au cours des dernières décennies, tant pour comprendre l'impact de certaines pathologies sur la fonction locomotrice que pour évaluer l'effet de la rééducation sur la qualité de la marche.

Au vu de la restitution de la mobilité de la personne atteinte, la rééducation locomotrice et/ou neurologique est le traitement de choix qui nécessite au physiothérapeute une connaissance accrue de la marche normale. Le présent mémoire s'articule autour d'un état de l'art portant sur la biomécanique de la marche normale et de la critique des expérimentations passées.

Dans un deuxième temps nous détaillerons la méthodologie utilisée, de la phase de recrutement des participants, des acquisitions de données dans trois conditions de marche à savoir la marche le long d'un corridor, celle sur un tapis roulant à double courroie en mode vitesse fixe et en mode haptique. Les données collectées permettront l'analyse des paramètres spatio-temporels dans les trois conditions de marche. Une discussion sera établie afin de confronter nos résultats aux études antérieures.

Enfin nous clôturerons cette contribution par des recommandations et une conclusion. Un tel travail nous permettra d'analyser la marche naturelle dans trois conditions différentes afin de prouver en définitive si la marche sur un tapis roulant en mode haptique se rapproche le plus

ou diverge de la marche naturelle sur corridor : telle est l'hypothèse principale de recherche de cette maîtrise.

Notre travail a été réalisé au sein même du Laboratoire de recherche en Imagerie et Orthopédie (LIO) du centre de recherche hospitalier universitaire de Montréal (CRCHUM).

Ce travail de recherche a été initié dans un premier temps aux vues d'évaluer la marche humaine chez des participants sains en analysant les paramètres spatio-temporels dans trois conditions de marche (marche le long d'un corridor, sur un tapis à vitesse fixe et en mode haptique). Le but de cette étude était d'ailleurs d'évaluer le mode de fonctionnement du tapis roulant en mode haptique par rapport d'une part à une marche sur un tapis roulant à vitesse fixe contrôlée et par rapport à une marche le long d'un corridor d'autre part. Les résultats de cette étude nous conduiront à conclure alors que la marche sur le tapis en mode haptique tend le plus vers la marche le long d'un corridor et donc vers une marche naturelle. Cela pourrait être par la suite expérimenté sur des participants pathologiques présentant une marche asymétrique tel que les personnes ayant subi un accident vasculaire cérébral et présentant une hémiparésie, afin de pouvoir réduire le plus possible l'asymétrie et restituer au mieux le patron de marche au quotidien.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART DE LA BIOMÉCANIQUE DE LA LOCOMOTION SUR TAPIS ROULANT À DEUX COURROIES ET LA MARCHÉ SUR CORRIDOR CHEZ LE SUJET SAIN

1.1 Biomécanique et outils de capture de la marche humaine

1.1.1 La standardisation du cycle de la marche normale

La marche bipédale est le mode de locomotion naturel de l'être humain combinant le maintien de l'équilibre en position verticale et sa propulsion, mettant en jeu de manière combinée et alternée les deux membres inférieurs.

La marche est une activité motrice cyclique qui alterne entre une phase d'appui (pied ipsilatéral en contact avec le sol) et une phase oscillante (pied ipsilatéral en phase d'envol).

Un cycle de marche est ainsi composé d'une phase d'appui (environ 60% du cycle) et d'une phase d'oscillation (environ 40% du cycle) des membres inférieurs droit et gauche (Perry & Davids, 1992).

Un cycle de marche est composé de deux pas, le pas est défini par la pose d'un talon et la pose du talon controlatéral. Les phases de double appui commencent à l'attaque d'un talon ipsilatéral et se terminent lors de la levée des orteils du pied controlatéral. Les phases de simple appui commencent à la levée des orteils d'un pied et terminent à la pose du talon du même pied.

Le schéma ci-dessous décrit les deux phases du cycle de la marche humaine normale.

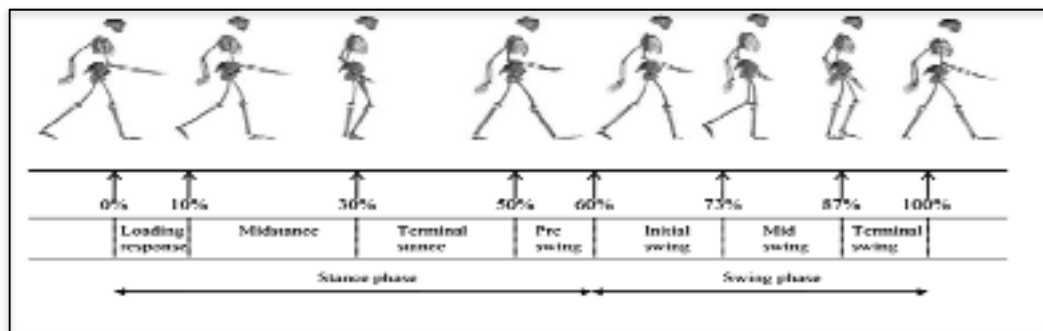


Figure 1.1 Décomposition du cycle de la marche

Tiré de De Guise, Mezghani, Aissaoui, & Hagemeister (2011, p. 90)

1.1.1.1 Décomposition du cycle de la marche

- **La phase d'appui**

Cette phase est définie comme la période pendant laquelle le pied est en contact avec le sol, elle représente d'ailleurs 60% du cycle de marche et est composée de quatre sous phases :

- La phase de mise en charge : Cette phase représente la période de double appui initial qui débute par l'attaque du talon et se termine lorsque le pied controlatéral décolle du sol;
- Le milieu de la phase d'appui : Ce qui correspond à la première moitié du simple appui (10% à 30%) ;
- La fin de la phase d'appui : Correspondant à la deuxième moitié du simple appui (30% à 50%) ;
- La pré oscillation : Correspondant à la période de double appui controlatéral.

- **La phase d'oscillation**

Elle est définie par la période où le talon n'est plus en contact avec le sol, et représente 40% du cycle de marche et regroupe trois sous phases :

- Le début de l'oscillation : Elle commence au décollage des orteils du sol et s'étend de (60% à 73%) du cycle de marche (voir fig. 1.1) ;
- Le milieu de l'oscillation : Elle représente le deuxième tiers de la phase d'oscillation qui s'étend de (73% à 86% du cycle de la marche) ;
- La fin de l'oscillation : Elle représente le troisième tiers de la phase d'oscillation.

1.1.2 Les caractéristiques spatio-temporelles de la marche

Les caractéristiques de la marche étudiée dans ce projet de recherche englobent les paramètres spatiaux et temporels.

1.1.2.1 Les paramètres spatiaux

Les paramètres incluent dans mon étude de recherche sont :

- La longueur de pas droit :
Elle est définie comme la distance antéro-postérieure en mètre séparant les deux contacts talon ipsilatéral gauche et controlatéral droit ;

- La longueur de pas gauche :
Elle est définie comme la distance antéro-postérieure en mètre séparant les deux contacts talon ipsilatéral droit et controlatéral gauche ;
- La longueur de foulée : Elle est définie comme la distance antéro-postérieure en mètre séparant les deux contacts talon du même côté, correspondant aussi à la longueur de deux pas consécutifs.

1.1.2.2 Les paramètres temporels

Les paramètres incluent dans mon étude de recherche sont :

- La vitesse de marche : Elle est le produit de la longueur de pas par la cadence et est exprimée en mètres/seconde ;
- La cadence : Elle est le rythme de la marche correspondant au nombre de pas par minute.

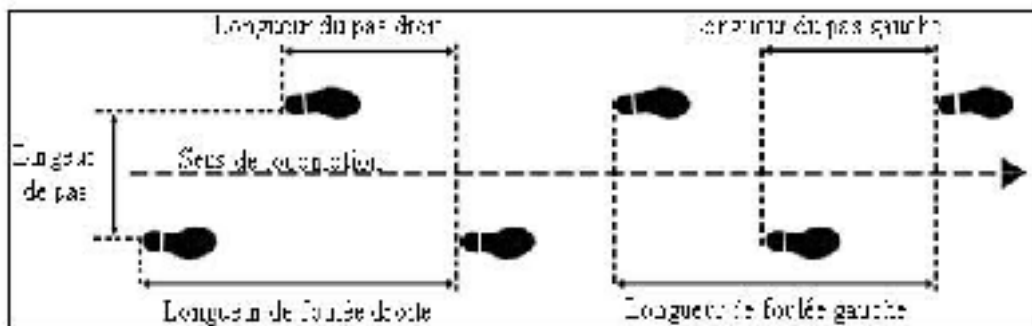


Figure 1.2 Caractéristiques spatiales du cycle de la marche
Tirée de Gourdou, (2010)

1.1.3 Capture et analyse du mouvement

1.1.3.1 Principe de fonctionnement du système de capture VICON du tapis roulant AMTI à deux voies

Le système VICON permet la mesure de la cinématique tridimensionnelle des segments corporels du membre inférieur et l'extraction des paramètres spatio-temporels. Le système VICON® T 20-S utilisé pour l'enregistrement de la cinématique est un outil de mesure de haute précision avoisinant les 200 micromètres dans la reconstruction 3D d'un marqueur comparativement au model VICON® 460 plus récent qui lui est précis à 63 ± 5 micromètres,

Windolf, Gotzen, & Morlock, (2008). Par ailleurs, les forces de réaction au sol lors de la marche sont mesurées grâce à un tapis roulant à deux voies de type AMTI en mode vitesse fixe et en mode haptique. Ce tapis est équipé de plates-formes dynamométriques permettant la mesure des forces et des moments des réactions au sol sur chaque voie.

1.1.3.2 Principe de fonctionnement du système de capture Xsens du LIO

Le système Xsens, composé de capteurs inertiels combinant des accéléromètres 3D, des gyroscopes 3D et des magnétomètres 3D, permet la reconstruction de l'orientation du corps humain dans l'espace tridimensionnel en temps réel. Il permet ainsi la mesure de la cinématique 3D de toutes les articulations du corps durant la marche et d'en déduire les paramètres spatio-temporels tels que décrits dans l'article de Roetenberg, Luinge, & Slycke, (2009).

Dans notre projet de recherche, ce système sera utilisé dans trois conditions de marche : la première le long d'un corridor, la seconde sur un tapis roulant à double voie en mode vitesse fixe et la troisième sur le même tapis, mais cette fois-ci en mode haptique. Un modèle estimant la vitesse de marche de chaque courroie indépendamment a été développé dans l'environnement de Matlab\Simulink. Ce modèle permet de contrôler la vitesse de marche en temps réel sur chacune des deux courroies.



Figure 1.3 Tapis roulant AMTI à double voie ainsi que le système de caméra VICON du LIO (CRCHUM)

La partie suivante traitera d'une revue de littérature s'articulant autour de la biomécanique de la marche humaine normale dans différentes conditions de marche : la marche le long d'un couloir, sur un tapis roulant à vitesse fixe ainsi que la marche sur un tapis en mode haptique. En effet, il sera question de mesurer des paramètres spatio-temporels tels que la longueur de pas, la longueur de foulée, la cadence, ainsi que la vitesse de marche grâce à des outils de mesure similaires utilisés dans certaines études, à ceux existant au sein de notre laboratoire de recherche à savoir, le système optoélectronique (VICON). Il s'agira de comparer par la suite ces paramètres dans les trois conditions, quantifiant la variabilité de la marche par la mesure du coefficient de variation (CV) : ceci permettra d'analyser le comportement de la personne lors de la marche.

Les auteurs ont quantifié les paramètres spatio-temporels le long du corridor et les ont comparés à chaque fois dans deux conditions de marche à savoir :

- La marche le long d'un couloir comparativement à la marche sur le tapis roulant à vitesse fixe ;
- La marche sur tapis à vitesse fixe comparativement à la marche en mode «haptique»;
- La marche le long d'un couloir comparativement à la marche sur le tapis roulant en mode haptique.

Par ailleurs, des chercheurs tel que Stolze et al., (1997), Wass, Taylor, Mastas., (2005) et Van de Putte, Hagemeister, St-Onge, Parent, & De Guise, (2006) se sont intéressés à la durée nécessaire au vu de la familiarisation de la marche sur un tapis roulant.

Cette revue apportera vraisemblablement un appui à nos résultats d'analyse des paramètres spatio-temporels étudiés, ou pourrait être en partie ou en totale divergence avec les résultats obtenus.

1.2 Revue de littérature

La revue illustrée ci-dessous allant de la période de 1983 à 2016, a porté sur la comparaison des paramètres spatio-temporels dans trois conditions de marche : marche le long d'un couloir, marche sur un tapis roulant à vitesse fixe et en mode haptique.

Cette revue s'articulera autour de la comparaison des paramètres spatio-temporels de la marche dans les trois conditions citées ci-dessus, de la notion de familiarisation ; c'est à dire le temps d'adaptation suffisant afin de marcher sur un tapis roulant instrumenté en comparant cette marche à celle le long d'un couloir et enfin des outils d'analyse de la marche tels que le

coefficient de variation (CV) ainsi que le GVI (Gait Variability Index) et se divisera en cinq sous-sections par condition de marche.

1.2.1 Évaluation des paramètres spatio-temporels lors de la marche le long d'un couloir

Chao, Laughman, Schneider, & Stauffer, (1983) ont réalisé une étude sur 148 adultes sains qui devaient marcher le long d'un couloir long de 10 m. Ces participants ont été divisés en trois groupes classés selon l'âge et le sexe. Le premier groupe a été évalué sur la durée de cycle, sur les forces de réaction au sol ainsi que sur les mouvements de l'articulation du genou. Le second groupe a été évalué sur la durée de cycle et les mouvements du genou et enfin le troisième groupe a été évalué sur les forces de réaction au sol. L'analyse des paramètres cités plus haut portait sur le calcul de la longueur de pas, la longueur de foulée, la cadence ainsi que la vitesse de marche. Les résultats obtenus révèlent que les paramètres tels que la cadence étaient plus élevés chez les femmes (108 pas/minute) tandis que chez les hommes la cadence se situait à 102 pas/minute. La longueur de pas droit mesurée chez les hommes était plus importante se situant en moyenne à 0,71 m tandis que chez les femmes elle se situait à 0,61 m en moyenne. La vitesse mesurée le long du couloir était plus importante chez les hommes et était estimée en moyenne à 1,23 m/s par rapport à celle mesurée chez les femmes qui était en moyenne 1,11 m/s.

Par ailleurs, Murray, Spurr, Sepic, Gardner, & Mollinger, (1985) ont menés une étude portant sur sept femmes en bonne santé physique, qui devaient marcher dans trois conditions différentes, à savoir : une vitesse basse, confortable et accélérée, le long d'un couloir de 14,5 m à vitesse confortable puis imposée par la suite sur le tapis roulant. Des mesures des paramètres spatio-temporels ont été réalisées le long du couloir et sur un tapis roulant.

Les résultats obtenus après avoir réalisé une ANOVA, démontrent qu'il n'y avait pas de différence significative des paramètres spatio-temporels que ce soit le long d'un couloir ou sur le tapis roulant même à vitesse basse, confortable ou élevée. Cela pourrait être dû à l'échantillon qui n'était pas assez représentatif, en comparaison à d'autres études ayant recruté plus de participants.

Néanmoins, il a été remarqué aussi que les sept participantes avaient tendance à adopter une cadence élevée et une longueur de pas plus petite sur le tapis, respectivement (120

pas/minute et 0,68 m) comparativement à celle mesurée le long du couloir, respectivement (117pas/minute et 0,70 m).

Hirokawa, (1989) a évalué les paramètres spatio-temporels de la marche humaine sur des participants sains comprenant 53 hommes et 39 femmes et leur a imposé de marcher pieds nus sous trois types de contraintes à savoir : une vitesse lente, rapide et confortable, et ce le long d'un parcours de 12 m. L'auteur a donc obtenu un coefficient de variation (CV) de la longueur de pas dans trois conditions de vitesse de marche, qui était très restreint de l'ordre de 3,5% en moyenne à vitesse confortable, de 4% à vitesse lente et de 4,5% à vitesse rapide. Il a été démontré aussi que plus la vitesse de marche était élevée, plus la population masculine avait tendance à augmenter leurs longueurs de pas à (0,72 m) et diminuer leur cadence de marche (138 pas/min). Par ailleurs, il a été noté une augmentation de la cadence de marche (150 pas/min) et une diminution de la longueur de pas (0,60 m) pour la population féminine toujours à vitesse élevée.

Hirokawa rapporte néanmoins que le CV représentait la reproductibilité de l'efficacité du mouvement de la marche et rapportait aussi que ce dernier tendait à diminuer à vitesse confortable (CV à 3,5%).

Une étude menée par Oberg, Karsznia, & Oberg, (1993) sur 233 participants sains âgés entre 10 et 79 ans, lesquels ont été répartis en sept groupes. Ils devaient marcher le long d'un couloir de 10 mètres, à trois vitesses de marche différentes auto sélectionnée : lente, normale et rapide où des acquisitions des paramètres spatio-temporels ont été collectées. Il y avait une différence statistiquement significative entre les femmes et les hommes concernant les paramètres spatio-temporels mesurés à savoir, la vitesse de marche, la longueur de pas ainsi que la cadence.

Les résultats de cette étude démontrent qu'à vitesse confortable, les hommes avaient une cadence de marche moins importante (119 pas/minute en moyenne) que celle des femmes (126 pas/minute en moyenne) dans la même tranche d'âge et que les longueurs de pas mesurées des hommes étaient plus importantes (0,64 m en moyenne) que celle des femmes (0,57 m en moyenne).

Cependant, il est à noter que le CV de la marche par rapport à la cadence chez les femmes et les hommes était pratiquement identique et chiffré respectivement à 7,75% et 7%.

Néanmoins, la variabilité de la marche par rapport à la longueur de pas était différente, les femmes avaient un CV plus faible que les hommes, quantifié respectivement à 6,2% et 7%.

1.2.2 Évaluation des paramètres spatio-temporels lors de la marche le long d'un corridor comparativement à la marche sur tapis à vitesse fixe

Stolze et al., (1997) ont mesuré neuf paramètres spatio-temporels (longueur de foulée, longueur de pas normalisée par rapport à la longueur du membre inférieur, largeur de pas, cadence, vitesse de marche, durée de la phase d'appui, durée de la phase d'envol, durée du double appui, durée de cycle), le long d'un couloir de 13 mètres et sur un tapis roulant à vitesse fixe (vitesse confortable) identique à celle mesurée le long du couloir chez 12 adultes (six femmes et six hommes). Afin de réaliser une analyse statistique, une moyenne ainsi qu'un écart-type ont été calculés sur les neuf paramètres spatio-temporels dans les deux conditions de marche citées ci-dessus, et ce pour 15 cycles de marche. Ils ont montré une différence significative des neuf paramètres spatio-temporels mesurés le long du couloir et sur le tapis roulant, à même vitesse de marche. À titre d'exemple, en marchant sur le tapis, les participants ont réduit leurs longueurs de pas (0,75 m) par rapport à celles mesurées le long du couloir (0,85 m), parallèlement la durée du cycle de marche passait de 1,04 seconde le long du couloir à 1.01 secondes sur le tapis roulant. Par ailleurs, les participants ont augmenté leurs cadences passant de 113 pas/m le long du couloir à 120 pas/m sur le tapis roulant.

Alton, Baldey, Caplan, & Morrissey, (1998), ont étudié la différence qui résidait entre les paramètres spatio-temporels (cadence, longueur de foulée) de la marche sur le tapis comparativement à ceux mesurés sur le corridor. Lors de cette étude, les participants marchaient le long d'un tapis roulant à l'état statique afin d'enregistrer les forces de réaction au sol (FRS) simulant ainsi la marche au sol. Les sujets ont par la suite marché sur le même tapis activé tout en enregistrant en même temps les FRS. Il a été constaté que la cadence de marche sur le tapis roulant était supérieure (122 pas/m) à celle enregistrée sur le sol (tapis inactif) qui était d'ailleurs chiffré à (117 pas/m). Même phénomène constaté par rapport à la longueur de foulée qui était de (1,32 m) le long du couloir et de (1,37 m) sur le tapis roulant, quel que soit le sexe pour les deux conditions de marche. Ces résultats sont en totale contradiction avec les travaux de Murray et al., (1985) et ceux de Stolze et al., (1997) qui avaient souligné une diminution de la longueur de foulée et une augmentation de la cadence sur le tapis roulant pour les femmes seulement. Cependant, Alton a mentionné qu'une période

d'accoutumance (familiarisation) insuffisante de marche sur le tapis roulant pourrait expliquer cette discordance.

L'étude de Riley et al., (2007) a été menée sur 26 participants sains afin de mesurer les paramètres spatio-temporels de marche le long d'un couloir de 15 mètres à une vitesse confortable et celle mesurée sur un tapis roulant instrumenté. Il a été constaté que les paramètres spatio-temporels obtenus dans les deux conditions étaient pratiquement similaires pour les trois essais de marche consécutifs à la même vitesse de marche imposée sur le tapis roulant et que ces différences étaient généralement dans la variabilité normale. La longueur de foulée et la cadence sur le tapis étaient estimées respectivement à 1,49 mètre et 113 pas/minutes comparativement à celle le long du couloir qui étaient respectivement de 1,50 mètre et de 112 pas/ minute quelques soit le sexe. Néanmoins Riley et al., (2007) insistent sur le fait que la vitesse, la longueur de pas ainsi que la cadence étaient plus constantes sur le tapis comparativement aux mêmes paramètres le long d'un corridor sachant que la vitesse sur le tapis roulant était la même et était chiffrée à (1,40 m/s) pour les trois essais de marche. Les auteurs Riley et al., (2007) concluent en affirmant que la marche sur le tapis roulant comparativement à celle sur le couloir est quantitativement et qualitativement similaire.

D'autres chercheurs tels que Lee & Hidler, (2008) ont analysé plusieurs paramètres de la marche, ces acquisitions ont été réalisées sur un tapis roulant à deux voies et le long d'un couloir de cinq mètres de long environ à vitesse confortable. Cette étude a porté sur 19 participants sains ne présentant aucun trouble de la marche, son but était de comparer les paramètres spatio-temporels sur deux milieux distincts cités ci-dessus. Les participants devaient marcher à vitesse confortable le long du couloir et une durée approximative de trois minutes était nécessaire à l'accoutumance de la marche sur tapis. Trois longueurs de foulées mesurées le long du couloir ont été comparées à trois longueurs de foulées mesurées sur le tapis roulant ainsi que la comparaison des paramètres temporels normalisés : la cadence, la vitesse de marche et la durée de cycle. Les résultats obtenus par Lee et Hidler sont en faveur d'une augmentation de la cadence et une diminution de la longueur de foulée sur tapis roulant respectivement (47 et 0,71 (données normalisées)) par rapport à la taille des participants comparativement aux résultats obtenus le long du couloir (respectivement 45 et 0,73 (données normalisées)) par rapport aussi à la taille des participants.

Le but de l'étude de Yang & King, (2016) était d'apprécier s'il existait une différence entre le patron de la marche le long du couloir comparativement à celui sur le tapis roulant. 54 personnes saines ont participé à cette étude. Chaque participant devait effectuer cinq essais sur un couloir de 14 mètres de longs suivis de cinq autres sur un tapis roulant à une vitesse confortable. Suite à cela, des paramètres spatio-temporels ont été mesurés puis comparés dans les deux conditions.

À titre d'exemple, la longueur de pas sur le tapis était significativement plus courte que celle mesurée le long du couloir (longueur de pas sur le tapis = 0,61 m, le long du couloir = 0,73 m. En ce qui a trait à la vitesse, elle était réduite sur le tapis et était chiffrée à $1,15 \pm 0,15$ m/s contrairement à celle enregistrée le long du couloir qui était à $1,41 \pm 0,20$ m/s. Les résultats obtenus lors de cette étude démontraient que les participants tendaient à maintenir une marche stable dans les deux conditions de marche que ça soit sur le tapis roulant ou le long du couloir lorsque la vitesse n'est pas imposée, d'ailleurs c'est l'une des principales fonctions du système nerveux central à maintenir l'équilibre de la posture et compenser les instabilités de la marche quel que soit le milieu où l'on marche rapportent les auteurs Yang & King, (2016). Nous pouvons retenir en conclusion que les participants marchaient plus lentement avec des longueurs de pas courts sur le tapis comparativement à leur marche le long du couloir.

Les participants démontraient aussi une démarche contrôlée sur le tapis roulant en effectuant de nombreuses modifications de leur patron de marche. Cette étude a ouvert la voie à des études sur le tapis roulant qui concerneraient des personnes âgées présentant des démarches pathologiques en vue de leur réadaptation.

En effet, le tapis roulant comporte des avantages évidents qui justifient l'attention que l'on porte à son usage lors de l'analyse de la marche, notamment l'économie d'espace important par rapport à un couloir de marche et la possibilité d'utiliser des moyens d'évaluation à type de caméras optoélectroniques VICON ou des capteurs inertiels à type Xsens, tout en ayant un participant en mouvement. De plus, le tapis roulant permet aux chercheurs de contrôler la vitesse dans un environnement de marche restreint Wass, Taylor, & Matsas., (2005). Cependant, les auteurs Wass, Taylor, & Matsas., (2005) ont réalisé une étude sur 16 participants âgés et sains qui devaient marcher le long d'un couloir et sur un tapis roulant à vitesse confortable et ce sur une durée de plus de 15 minutes. Il a été constaté que la majorité des participants ne pouvaient pas se familiariser à marcher sur le tapis en moins de 15 minutes. La cadence variait considérablement pendant les essais de marche et tendait à

diminuer et à se stabiliser au bout de la huitième minute de marche autour de 104 pas/min concernant les participants âgés. Par ailleurs, une fatigue notable a été soulignée par les participants sur les essais de marche, ce qui pourrait expliquer la diminution de la cadence de marche.

Ainsi Hollman et al., (2016) ont recruté 20 participants sains afin de marcher le long d'un couloir et sur un tapis roulant à vitesse fixe pour une durée de six minutes. Ces participants ont été dotés de six capteurs inertiels qui ont servi à mesurer les paramètres spatio-temporels de la marche. La vitesse de marche sur le tapis a été déterminée après avoir marché trois fois une longueur de 10 mètres le long d'un couloir à une vitesse naturelle et cela pour chaque participant. L'hypothèse de recherche de cette étude était de démontrer qu'il existait moins de variabilité des paramètres spatio-temporels de la marche sur le tapis comparativement à une marche naturelle le long d'un couloir.

En comparant les données moyennes des paramètres spatio-temporels des deux conditions, il s'est avéré qu'il n'y avait pas de différence apparente ($p > 0,05$). À titre d'exemple, la longueur de foulée le long du couloir était de $1,57 \pm 0,09$ mètre et celle sur le tapis était de $1,58 \pm 0,09$ mètre, la vitesse de marche était de $1,53 \pm 0,10$ m/s le long du couloir tandis que celle mesurée sur le tapis était de l'ordre de $1,54 \pm 0,09$ m/s et enfin la cadence de marche était de $116 \pm 5,6$ pas/minute le long du couloir alors que sur le tapis elle était de $117 \pm 5,4$ pas/minute.

Les auteurs Hollman et al., (2016) ont conclu que le tapis procurait moins de variabilité des paramètres spatio-temporels de la marche (longueur de foulée, vitesse de marche et cadence à titre d'exemple) d'un cycle à un autre comparativement à la marche le long du couloir, cela est dû au fait que le tapis impose un pattern de marche invariant dans le temps, il existait donc une différence significative entre la variabilité le long du couloir et celle sur le tapis roulant à vitesse fixe ($p < 0,05$). Dingwell et al. (2001) avaient partagé aussi l'avis des auteurs Hollman et al., (2016) affirmant que la variabilité de la durée de cycle était réduite sur le tapis roulant concernant des personnes saines alors la moyenne des durées de cycles ne différait pas entre les deux conditions de marche (couloir vs tapis roulant).

Une autre étude menée par Harris-Love, Forrester, Macko, Silver, & Smith, (2001) a été réalisée sur 18 individus ayant présenté un AVC survenu 39 mois en moyenne avant la réalisation des acquisitions des essais de marche. Les participants devaient marcher le long d'un couloir à la même vitesse que celle imposée sur un tapis roulant. Il a été constaté que la marche hémiparétique était très variable le long du couloir par rapport à celle sur le tapis, estimée par le CV qui était moins important sur le tapis de 51 % comparativement au couloir pour le paramètre temporel : durée de cycle qui était de 7,8% le long du couloir et de 4% sur le tapis. Il a été remarqué aussi que la durée de la phase d'appui du membre parétique était plus courte par rapport à la phase d'envol. Le ratio phase d'appui / phase d'envol du membre parétique diminuait à la marche sur le tapis roulant comparativement à celle le long du couloir. Il a été retenu que le tapis roulant altérait le patron de marche des participants hémiparétiques le rapprochant ainsi d'une marche plus symétrique par rapport à celle observée le long du couloir.

1.2.3 Évaluation des paramètres spatio-temporels lors de la marche sur le tapis roulant à vitesse fixe comparativement à la marche sur tapis en mode « Auto Contrôlé »

Sloot, Van Der Krogt, & Harlaar, (2014) ont mené une étude qui a permis de comparer la marche sur le tapis roulant en mode vitesse fixe à la marche sur le tapis roulant en mode « auto contrôlée » de la vitesse par le participant lui-même. Cette étude incluant 19 participants sains comprenant 12 hommes et sept femmes. Les auteurs ont ensuite comparé les paramètres spatio-temporels exploités à partir des données cinématiques dans les deux conditions de marche et ont réalisé des tests statistiques de type ANOVA.

Les résultats des analyses statistiques ont permis de conclure que la vitesse de marche ainsi que la longueur de foulée variaient considérablement dans le temps dans le mode « auto contrôlée » et étaient respectivement 54 % et 39 % plus importantes que lors de la marche sur le tapis en mode vitesse fixe évaluée sur une longue période de marche. Sloot, Van Der Krogt, & Harlaar, (2014) ont affirmé l'existence d'une différence significative entre les deux modes de contrôle du tapis.

Ils ont constaté aussi que la marche sur le tapis en mode « auto contrôlée » pouvait possiblement procurer une variabilité d'une démarche normale se rapprochant ainsi de la marche naturelle le long d'un couloir, et ce comparativement à la marche sur le tapis à vitesse fixe, c'est d'ailleurs ce qui a été rapporté aussi par les participants.

1.2.4 Évaluation des paramètres spatio-temporels lors de la marche sur le tapis roulant en mode haptique comparativement à la marche le long d'un couloir

Une étude très intéressante est celle proposée par Feasel et al., (2011) qui portait sur cinq patients souffrant d'asymétrie de la marche faisant suite à des désordres musculo-squelettiques, neurologiques et mécaniques (ACV, prothèse totale de la hanche, amputations du membre inférieur, etc.). Ils devaient marcher à une vitesse naturelle sur un tapis roulant pendant une durée allant de 20 à 40 minutes puis ils devaient ensuite enchaîner une marche le long d'un couloir à vitesse confortable.

L'auteur décrit que la marche sur tapis roulant en mode haptique, symétrise les patients et cela comparativement à la marche le long d'un couloir. Il a d'ailleurs développé, dans le cadre de la réadaptation de ces dits patients, une méthode de rétroaction visuelle du degré d'asymétrie utilisant ainsi un environnement virtuel qui a pour but de courber une trajectoire en fonction du degré d'asymétrie en vue de la correction de l'asymétrie à l'aide d'un protocole de réadaptation.

Le IVERT (Integrated Virtual Environment Rehabilitation Treadmill) contrôle l'algorithme, estime la vitesse du participant en temps réel à partir des FRS et du centre de pression du corps (COP). L'estimation de la longueur de pas ainsi que la cadence est calculée à partir de la distance antéro-postérieure séparant les deux COP des deux contacts talons ipsi- et controlatéral se trouvant chacun sur une courroie du tapis pourvu de plateformes de force. Quant à l'accélération du pied, elle est estimée à partir de l'intégration des forces de réaction au sol antéro-postérieures durant la phase d'appui de chaque membre.

Il a été remarqué que tous les participants se sont vite adaptés à la marche sur le tapis et étaient capables de maintenir une vitesse stable. Ils avaient durant les cinq premières minutes de marche sur le tapis une vitesse de marche initiale qui se rapprochait de celle du couloir : participant 1 (écart moyen couloir-tapis = : 0,07 m/s), participant 2 (écart moyen couloir-tapis = : 0,03 m/s), participant 3 (écart moyen couloir-tapis = : 0,19 m/s), participant 4 (écart moyen couloir-tapis = : 0,05 m/s) et le participant 5 (écart moyen couloir-tapis = : 0,07 m/s). De manière quantitative, les participants avaient tendance à adopter une démarche symétrique durant la marche sur le tapis roulant. Statistiquement, il n'y avait pas de différence de symétrie des paramètres spatio-temporels de la marche entre la première et la dernière minute de marche sur tapis haptique.

Il est à noter aussi que dans 79% des essais, le plus grand taux de symétrie des paramètres spatio-temporels survenait durant les deux dernières minutes de marche sur le tapis.

En conclusion, Feasel et al. (2011) décrivent que leurs approches de rééducation sur le tapis roulant en mode haptique, demeurent plus efficaces, car les personnes atteintes perçoivent une amélioration de leurs manières de marcher se traduisant par une symétrisation de leurs patrons de marche en temps réel.

Marcoux, (2015) a développé au sein du LIO un nouveau mode de contrôle du tapis roulant, appelé « haptique ». Dans ce mode de contrôle, la vitesse transmise aux bandes du tapis n'était plus fixe et imposée par l'opérateur, mais variable dans le temps. Cette vitesse de courroie était déterminée par l'action de l'utilisateur sur le tapis. L'objectif de ce travail de recherche était d'implémenter en temps réel un modèle qui permettrait aux participants de contrôler la vitesse du tapis à la demande. L'étude de Marcoux, (2015) consistait dans le développement d'un modèle de contrôle haptique d'un tapis roulant à double courroie en utilisant les FRS ainsi que les moments directement mesurés sur le tapis. L'étude préliminaire portait sur six sujets qui ont participé à la validation du modèle en mode symétrique qui était en mesure d'estimer la vitesse de marche avec une bonne précision (2.88% en erreur RMS) et en mode asymétrique et consistait à la fin de l'expérience de remplir un questionnaire qualitatif sur l'expérience vécue sur le tapis roulant haptique. Les vitesses moyennes obtenues sur le tapis roulant ont été comparées aux vitesses moyennes observées lors d'une marche dans un couloir afin de déterminer si les sujets étaient en mesure de reproduire leur marche naturelle sur le tapis haptique. Par la suite, le modèle a été implémenté sur le tapis roulant à double voie AMTI du laboratoire du LIO.

A cet effet une analyse de variance (ANOVA) été réalisée entre les vitesses au sol et celles sur le tapis roulant en mode haptique, ne s'est pas révélé significative. L'auteur a aussi souligné que le nombre restreint des sujets (au nombre de six) ne pouvait pas permettre de tirer une conclusion solide, d'ailleurs un plus grand nombre de sujets aurait été souhaitable.

1.2.5 Évaluation des paramètres spatio-temporels lors de la marche sur un tapis roulant à vitesse fixe

Gourdou, (2010) a étudié les modifications des variables spatio-temporelles durant différents essais d'asymétrie de la marche. Dix-sept participants sains ont été recrutés et ont effectué 18 essais de marche d'une durée de cinq minutes chacun sur un tapis roulant à deux voies. La vitesse de la voie sous la jambe dominante était réglée aléatoirement à l'une des trois vitesses de référence fixées : vitesse de référence 1 = 0,75m/s, vitesse de référence 2 = 1m/s, vitesse de confort qui correspond à la vitesse de marche confortable du sujet. Dans un deuxième temps, la voie sous la jambe non dominante était modifiée aléatoirement de façon que sa vitesse soit d'un écart égal à 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, ou 50% par rapport à la vitesse dominante. Une fois ces six essais complétés, une série de répétition de deux fois se fera pour les autres vitesses de référence.

Pour analyser les résultats, les 10 cycles de marche les plus répétables basés sur les FRS verticales pour chacun des membres inférieurs pour chaque essai ont été conservés afin d'analyser entre autres toutes les variables spatio-temporelles. Des analyses de variance (ANOVA) ont été utilisées pour juger les effets des taux d'asymétrie sur les modifications des variables spatio-temporelles. Il a été démontré qu'une modification des variables spatio-temporelles engendrait une modification du patron de marche en fonction du taux d'asymétrie. Ces modifications évoluent différemment pour chacun des membres étudiés (dominant, non dominant). En mode symétrique, quand la vitesse de marche augmente, la cadence des cycles augmente et par conséquent la durée de cycle diminue : 1.41 seconde pour la vitesse de référence 1 à 1.22 s pour la vitesse de référence 2 puis à 1.05 code pour la vitesse de confort.

En mode asymétrique, la longueur de pas ainsi que la longueur de foulée sont beaucoup plus sensibles aux changements de vitesse que la largeur de pas et ont sensiblement les mêmes évolutions et sont moins prédictibles, Il a donc été observé une diminution de la longueur de foulée qui était directement liée à l'augmentation du taux d'asymétrie.

Lauzière, Miéville, Duclos, Aissaoui, & Nadeau, (2014) ont quant à eux mené une étude proprioceptive portant sur 16 participants âgés de 70 ans en moyenne (6 femmes et 10 hommes) en bonne santé physique. Ces derniers devaient marcher sur un tapis roulant

instrumenté à deux voies à vitesse fixe et en mode vitesse confortable. Au tout début de l'expérience, la vitesse des deux courroies du tapis était similaire, par la suite la vitesse a été modifiée par un pas très faible jusqu'à ce que le participant ressente le seuil de transition de la vitesse imposée. L'hypothèse de recherche stipulait que lorsque le seuil de détection de l'asymétrie de marche présentait un ratio de la vitesse de courroie se situant entre 0,80 et 0,90, au moins un paramètre spatio-temporel de la marche serait différent. Le ratio du seuil de perception de la vitesse de confort en mode symétrique se situait entre 0,88 et 0,85. Quant au ratio de la phase d'appui, il était fortement lié à la vitesse du tapis en mode asymétrique de la courroie.

Aucune corrélation statistiquement significative n'a été retrouvée entre la vitesse de marche de confort sur le tapis et le seuil de perception de l'asymétrie de marche ($r \leq 0,22$). Une ANOVA à mesures répétées a révélé que le seuil de perception de la symétrie de la marche n'était pas significatif. La variabilité inter sujet de la perception du seuil de symétrie était très élevée. Le coefficient de variation (CV) de la vitesse de marche variait entre 47% à 59% pour les différences absolues et à 7% pour les ratios de symétrie. Les données recueillies lors de cette étude pourraient servir dans un futur proche à déterminer le seuil de perception de la marche asymétrique des personnes victimes d'un AVC.

Van de Putte, Hagemester, St-Onge, Parent, & De Guise, (2006) ont réalisé une étude sur 10 participants sains afin de déterminer la durée requise au vu de s'habituer à marcher sur le tapis roulant. Les paramètres spatio-temporels (longueur de foulée, cadence de foulée, durée de foulée) ainsi que la cinématique de l'articulation du genou ont été particulièrement analysés au cours de cette étude. Une première conclusion était qu'il fallait 10 minutes de marche en continu sur le tapis afin de reproduire une longueur de foulée relativement identique d'un cycle à un autre. Lors de l'analyse des paramètres spatio-temporels, Il a été remarqué que les participants ne variaient pas considérablement durant les 15 premières minutes de marche. Plus le participant marche sur le tapis et plus sa longueur de foulée diffère significativement après les 15 premières minutes de marche, il y a donc un effet de fatigue et donc une variabilité de la marche d'un cycle à un autre. Les auteurs ont remarqué une augmentation en moyenne de 3,5 cm par rapport à la longueur de foulée, et ce après la dixième minute de marche.

Comparativement à l'étude de Wass, Taylor & Matsas, (2005), les participants étaient plus âgés avec une moyenne d'âge de 74 ans et avaient besoin de plus de temps afin de s'habituer

de marcher sur le tapis roulant, il leur fallait donc 14 minutes. Pour Stolze et al., (1997), cinq minutes seraient suffisantes afin de se familiariser avec le tapis roulant à une voie.

Dans la même optique, Zeni & Higginson, (2010) avaient comme objectif de déterminer la période de familiarisation requise afin que les 11 participants sains puissent marcher sur un tapis roulant et reproduire ainsi le plus possible les paramètres spatio-temporels de la marche d'un cycle à un autre à savoir la longueur de pas et la largeur de pas. Dans leur étude, chaque participant a marché une seule session de 9 minutes. La vitesse imposée sur le tapis a été choisie à partir de la marche de ces participants le long d'un couloir de 10 mètres et se situait entre 1,25 et 1,30 m/s.

Les paramètres spatio-temporels tels que la longueur et la largeur de pas ont été enregistrés afin d'estimer le CV de la marche calculé à partir de la moyenne ainsi que l'écart-type. Pour ce qui est des paramètres spatio-temporels, il a été remarqué des changements significatifs de l'écart-type moyen de la longueur de pas, entre chaque participant jusqu'à la septième minute de marche sur le tapis. Il n'y avait pas de différence significative de la moyenne de la longueur de pas de la première à la neuvième minute de marche, la différence de la longueur de pas la plus importante entre les essais allant de la première à la neuvième minute était de 0,4 cm. Par ailleurs il y avait une différence significative de la largeur de pas, elle se situait à 1,3 cm.

L'auteur conclut que la différence entre la valeur maximale et minimale de la moyenne des paramètres étudiés ci-dessus excepté la largeur de pas, n'était pas significative et recommande que la familiarisation de la marche sur le tapis réduirait la variabilité intra-sujet (écart-type) des paramètres cinétiques, cinématiques et spatio-temporels. Un temps supplémentaire de cinq minutes pourrait s'ajouter pour réduire cette variabilité de la marche sur le tapis roulant. L'auteur n'a malheureusement pas donné de valeurs numériques concernant la variabilité des paramètres spatio-temporels.

Masani, Kouzaki, & Fukunaga, (2002) ont traité la variabilité des FRS durant la marche sur un tapis roulant à deux voies. Pour ce faire, 10 participants sains ont participé à cette étude et devaient marcher à différentes vitesses de marche imposées. Les méthodes statistiques conventionnelles ont été utilisées afin de calculer les moyennes et les écarts-types des FRS, puis leurs variabilités en utilisant le CV. Les effets des différentes vitesses sur les CV ont été testés par une analyse de variance à un facteur (ANOVA) avec des mesures répétées. Il a été remarqué que la variabilité des FRS en F_V était à sa valeur minimale à une certaine vitesse

de marche quantifiée dans cette étude à 1,6 m/s avec un CV correspondant à 6% en moyenne pour chaque pied. Nous pouvons donc en conclure que la variabilité de la marche est intimement liée à la vitesse de marche.

Par ailleurs Masani cite Yamasaki, Sasaki, & Torri, (1990) qui ont travaillé sur la variabilité de la marche humaine sur le tapis roulant en comparant deux populations de sexe opposé. Les femmes avaient tendance à augmenter leur cadence et diminuer leurs longueurs de pas (136 pas/minute, 0,66 m), par rapport aux hommes (123 pas/minute, 0,73 m), à vitesse égale ici par exemple : 1,5 m/s, cette différence était étroitement liée à la taille des individus.

Yamasaki et al., (1990) rapportent que si les valeurs des paramètres spatio-temporels sont normalisées à la taille des participants, la variabilité de ces paramètres (longueur de pas, vitesse, cadence) entre les femmes et les hommes tend à diminuer, car les femmes dans cette étude ont une taille moindre que celle des hommes. Nous prendrons à titre d'exemple la longueur de pas normalisée aussi bien chez les hommes et les femmes, à vitesse égale (1,5 m/s), cette longueur de pas normalisée se confond entre les deux sexes et est de 0,43.

Par ailleurs, Yamasaki et al., (1990) ont mesuré le CV chez des hommes et des femmes de la longueur de pas à différentes vitesses de marche allant de 1 à 2 mètres/s. Il a été remarqué que le CV le plus bas aussi bien chez les hommes que les femmes se situait à une vitesse de marche sur le tapis de 1,67 m/s et était respectivement de 2,2% et de 2,5%. Plus on s'éloignait de cette vitesse, plus le CV augmentait et donc plus la marche sur le tapis variait. Le but de l'étude de Kang, Chaloupka, Mastrangelo, & Hoffman, (2002) était d'analyser le comportement biomécanique de la marche. Pour ce faire, 22 participants (11 femmes et 11 hommes) ont été recrutés afin de marcher sur un tapis roulant pendant une durée de 8 minutes à vitesse fixe estimée à 1,3 m/s. Des paramètres spatio-temporels ont été mesurés tels que la longueur de foulée et la cadence.

Il n'y avait pas de différence d'âge entre les hommes et les femmes, ces dernières avaient une masse corporelle plus importante que celle des hommes et une taille moindre comparativement aux hommes, cela rejoint l'étude de Yamasaki et al., (1990). Il a été remarqué que les hommes avaient tendance à avoir une longueur de foulée plus importante (1,52 m) ainsi qu'une cadence moins importante (106 pas/minutes), cela comparativement aux femmes (1,38 m, 114 pas/minute).

Hausdorff, (2005) a quant à lui traité une étude s'articulant autour de la mesure de la variabilité du cycle de la marche. Cet article traite de la variabilité de la marche chez des sujets sains

âgés (1) comparativement à des participants âgés avec un potentiel accru de risque de chute (2) parkinsonien et personnes atteintes du syndrome d'Alzheimer.

Il a été rapporté dans cet article que lors de la marche dans un milieu contrôlé et concernant des participants sains que le CV d'une foulée à une autre était relativement bas (de l'ordre de quelques pour cent). La figure ci-dessous illustre la différence du coefficient de variation de deux populations distinctes (1) et (2).

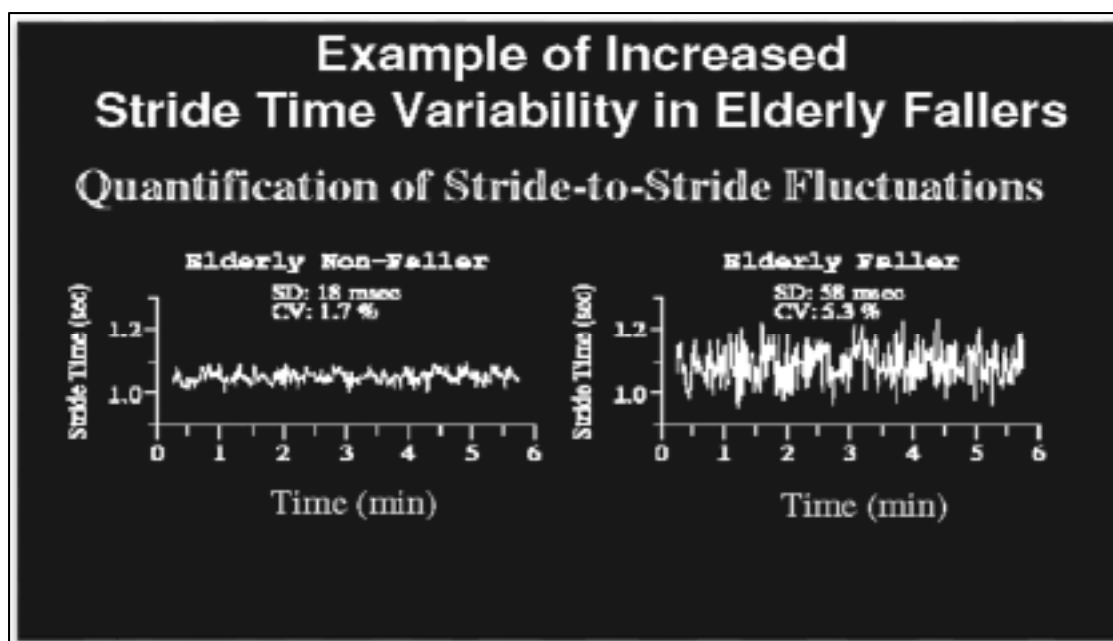


Figure 1.4 Variabilité de la durée de cycle chez la personne âgée avec et sans risque potentiel de chute
 Tiré de Hausdorff, (2005)

Nous remarquons aussi que le CV chez les personnes âgées susceptibles de chuter est pratiquement trois fois plus important (CV=5,3%) comparativement à celui des personnes âgées saines (CV=1,7%). D'autres remarques pertinentes d'articles cités par Hausdorff, (2005), est que la variabilité de la longueur de foulée est inaltérée chez les personnes âgées saines lors de la marche, mais cette dynamique change avec le vieillissement chez les personnes victimes d'AVC et celles ayant des maladies neurodégénératives (Blin et al., (1990), Herman et al., (2005), Hausdorff et al., (1997), Owings et al., (2004).

Pour conclure cette revue, l'étude de Gouelle, Mégrot, Presedo, Husson, Yelnik & Pénecot, (2013), s'était penchée sur un index nommé Gait Variability Index (GVI) mesurant la stabilité

au cours de la marche avait pour objectif d'améliorer la détection des patients à risque de chuter et à fournir des informations importantes dans le suivi thérapeutique.

Cet index prend en compte la fluctuation et la dynamique de la marche afin de quantifier sa variabilité par rapport à neuf paramètres spatio-temporels (longueur de pas, longueur de foulée, durée du pas, durée de foulée, la durée de la phase d'envol, la durée de la phase d'appui, durée du simple appui, durée du double appui et en fin la vitesse de marche) sur une piste de marche électronique GAITRite concernant une population variée de 250 individus, dont 123 en bonne santé, âgés entre 22 et 62 ans et 127 atteints de l'ataxie de Friedrich (maladie neurovégétative). Gouelle et al., (2013) rapportent que l'utilisation de l'écart-type ainsi que du CV présente des limites par rapport à l'écart-type, ce dernier serait sensible à l'échelle de mesure. Concernant le CV, il serait sensible à la moyenne, car si cette dernière est proche du zéro, le CV tendrait vers l'infini, d'autre part ces méthodes ne renseignent pas sur la dynamique de fluctuation de la marche.

Il a été constaté que le GVI des personnes atteintes de l'ataxie de Friedrich diminuait par rapport à celui mesuré sur les personnes saines. Pour faciliter la lecture du GVI, quand ce dernier perd 10 points, cela voudrait dire que les paramètres spatio-temporels de la personne atteinte s'éloignent d'un écart-type par rapport à la moyenne de la population normale. Le GVI se situait à $(70 \pm 7,9)$ comparativement aux personnes saines $(100 \pm 8,6)$ qui demeure selon l'auteur la valeur de référence. Le GVI a été développé afin d'estimer une mesure quantitative de la variabilité de la marche.

Soit pour une personne α , les 18 paramètres spatio-temporels (neuf du côté droit et neuf autres du côté gauche) p_n ont été multipliés par leurs coordonnées factorielles f_n respectives ainsi la somme des produits est illustrée ainsi :

$$S\alpha = \sum_1^{18} (p_n . f_n) \quad (1.1)$$

Cependant, en vue d'interpréter le GVI, des manipulations mathématiques ont été apportées : Soit S^{HP} , la somme moyenne dans la population saine ou normale. La distance $d^{\alpha,HP}$ entre les paramètres de la personne α et ceux de la population de référence :

$$d^{\alpha,HP} = \| S\alpha - S^{HP} \| \quad (1.2)$$

Un index brut est alors obtenu sous la forme :

$$GVI_{raw}^{\alpha} = \ln (d^{\alpha,HP}) \quad (1.3)$$

Ensuite le z-GVI est calculé, c'est-à-dire le nombre d'écarts-types qui sépare le score brut du sujet α du score brut de HP :

$$zGVI_{raw}^{\alpha} = GVI_{raw}^{\alpha} - \text{Mean} (GVI_{raw}^{HP}) / S.D(GVI_{raw}^{HP}) \quad (1.4)$$

En définitive, le z-GVI sera multiplié par 10 et soustrait de 100 ce qui donnera :

$$GVI^{\alpha} = 100 - 10 zGVI_{raw}^{\alpha}. \quad (1.5)$$

Le GVI est un score sur 100, si celui-ci est ≥ 100 cela voudrait dire que la personne atteinte est aussi variable (aussi stable) que la population normale. Si par contre le GVI diminue, cela voudrait dire que la variabilité de la personne se situe au-delà ou en deçà des valeurs identifiant une population normale.

1.2.6 Synthèse des expérimentations passées

Un tableau récapitulatif des expérimentations passées allant de la période de 1983 à 2016 nous semble important afin de segmenter et exposer brièvement le travail des chercheurs dans ce vaste domaine qu'est l'analyse de la marche humaine naturelle et la rééducation fonctionnelle de ses anomalies.

Tableau 1.1 Synthèse de la revue de littérature

Auteurs	Nombre de participants	Tapis / Corridor	Capture	Paramètres spatio-temporels analysés	Objectif de Recherche	Résultats
Chao et al., (1983)	148 adultes sains	Deux plateformes de force de type Kistler situées sur une distance de 10 mètres	Goniomètre Deux capteurs positionnés sous les pieds.	Longueur de pas Durée du cycle Cadence	Déterminer que le sexe est plus déterminant dans la variabilité de la marche que l'âge	Cadence plus élevée chez les femmes (108 pas/minutes) Longueur de pas plus importante chez les hommes (0,71 m) Vitesse plus importante chez les hommes (1,23 m/s).
Murray et al., (1986)	Sept femmes	Le long d'un couloir de 14,5 m et sur le tapis roulant	Appareil photo de type Polaroid à interruption de lumière.	Longueur de pas Durée du cycle Cadence Durée de double support	Comparaison des paramètres spatio-temporels dans deux conditions de marche : couloir vs tapis roulant.	Longueur de pas plus importante sur le couloir que le tapis (0,70 m), 0,68 m (tapis). Cadence plus grande sur le tapis. Tapis 120 pas/minute, 117 pas/minute (couloir).
Hirokawa., (1989)	53 hommes 39 femmes	Parcours de 12 m de longueur pourvu d'une surface de contact sensible à l'appui.	Multiplexeur digital vidéo	Longueur de pas Cadence Vitesse de marche	Analyse du CV de la longueur de pas sous 3 vitesses de marche	Le CV de la longueur de pas tend à diminuer à vitesse confortable et est chuté à 3 %. Elle est chutée à 4 % pour la vitesse lente et rapide. Plus la vitesse augmente plus la longueur de pas augmente chez les hommes et la cadence augmente chez les femmes.
Stoize et al., (1997)	Six femmes Six hommes	Couloir Tapis mono bande.	Système optoélectronique	Longueur de pas Durée du cycle Cadence Vitesse de marche Durée de la phase d'appui Durée de la phase d'envol Durée de cycle	Investigation sur la différence entre la marche sur tapis vs marche sur couloir à vitesse égale	-Durant la marche sur le tapis, la cadence augmente (120 pas/min) par rapport à celle sur le couloir (113 pas/min). -En marchant sur le tapis, les participants ont réduit leurs longueurs de foulée (1,55 mètre) par rapport à celle mesurée le long du couloir (1,63 mètre).
Alton et al., (1998)	17 adultes sains	Tapis roulant Couloir long de 7,5 mètres	Système optoélectronique	Longueur de foulée Cadence Durée de la phase d'appui. Durée de la phase d'envol.	Différence entre les paramètres spatio-temporels sur couloir vs tapis chez les femmes et les hommes.	La cadence moyenne de la population sur le tapis roulant était supérieure (122 pas/minutes) à celle enregistrée sur le sol (tapis inactif) qui était d'ailleurs chutée à (117 pas/minutes). -Même phénomène constaté par rapport à la longueur de foulée moyenne qui était de (1,32 mètre) le long du couloir et de (1,37 mètre) sur le tapis roulant, et ce aussi bien chez les hommes que les femmes.

Tableau 1.1 Synthèse de la revue de littérature (Suite)

Auteurs	Nombre de participants	Tapis / Corridor	Capture	Paramètres spatio-temporels analysés	Objectif de Recherche	Résultats
Masani et al., (2001)	10 hommes sains	Tapis à deux voies doté de plateformes de force	Quatre capteurs piézoélectroniques tridimensionnels sous chaque bande du tapis.	Calcul des FRS. Calcul du CV de la longueur de pas (L pas)	Apprécier l'influence de la vitesse de marche du tapis sur la variation de la longueur de pas estimée à partir des FRS.	CV L pas = 2,8 % à vitesse Confortable (1,57 m/s). CV L pas = 4,9 % à vitesse basse. CV L pas = 3,8 % à grande vitesse.
Michelle L. Harris-Love et al., (2001)	16 Participants hémiparétiques (39,5 mois après la survenue d'un AVC).	Tapis à vitesse Fixe. GaitRite.	Semelles pourvues de capteurs de pression.	Temps d'appui Ratio durée d'appui/ durée d'envol. Cadence CV du temps d'appui.	Comparaison des effets du tapis roulant vs couloir sur la variabilité des paramètres spatio-temporels de la marche.	Le tapis roulant à vitesse fixe réduit la variabilité de la marche hémiparétique, car la marche de ce dernier présente une variabilité plus importante lors de la marche le long du couloir.
Wass et al., (2004)	8 Femmes 8 Hommes	Couloir de 10 mètres (8 essais) Tapis mono bande	Système optoélectronique	Cadence	Appréier la Familiarisation de la Marche sur le tapis roulant par rapport à celle sur le couloir.	Changement de la cadence sur 14 minutes de marche et sa stabilité autour de la 10 ^{ème} minute autour de 106 pas/min pour l'ensemble du groupe. Temps de marche le long du couloir non spécifié par l'auteur.
Hausdorff., (2005)	500 personnes	Couloir	Système optoélectronique	Calcul du CV de la durée de cycle chez 2 populations âgées saines et susceptible de chuter.	Etude de la variabilité de la marche afin de quantifier les différents changements liés à l'âge et au vieillissement en vue de la réadaptation fonctionnelle.	Chez les personnes saines, la variabilité de la durée de foulée est relativement basse (1,7%) comparativement à celle des personnes susceptibles de chuter (5,3%).
Van de putte Et al., (2006)	10 personnes saines	Tapis à 2 voies	Système de capture du mouvement Optotrak.	Longueur de foulée Cadence Durée de la phase d'appui. Durée de la phase d'envol.	Appréier la durée nécessaire à la familiarisation de la marche sur le tapis roulant en mesurant la longueur de foulée et quantifier sa reproductibilité.	~10 minutes de familiarisation sont nécessaires afin de reproduire une foulée chez des personnes âgées ou ayant subi une blessure nécessitant un temps supplémentaire.

Tableau 1.1 Synthèse de la revue de littérature (Suite)

Auteurs	Nombre de participants	Tapis / Corridor	Capture	Paramètres spatio-temporels analysés	Objectif de Recherche	Résultats
Lee et al., (2007)	10 femmes 9 hommes	Tapis roulant A 2 voies Plateformes de forces	Système Optoelectronique	Cadence. Longueur de foulée. Durée de la phase d'appui. Durée de la phase d'envol	Comparaisons des paramètres spatio-temporels sur le tapis vs corridor en utilisant les ANOVA.	Très peu de différences obtenues entre les paramètres spatio-temporels enregistrés sur le tapis par rapport à la marche le long du couloir. Ex : Cadence normalisée sur le Tapis = 47, le couloir = 45. Long de foulée normalisée sur le tapis = 0,71, le couloir = 0,73.
Zeni et al., (2009)	11 personnes saines	Tapis roulant à 2 voies doté de plateformes de forces. Couloir de 5 mètres de long.	Système Optoelectronique	Largeur de pas Longueur de pas	Déterminer la variabilité des paramètres spatio-temporels entre les 9 minutes de marche sur le tapis roulant utilisant des ANOVA.	Pas de différence significative de la moyenne de la longueur de pas durant les neuf minutes de marche. La différence entre la première et la neuvième minute était de 0,04 mètre
Feasel et al., (2011)	5 participants Atteints d'hémiplégie	Tapis roulant pourvu de plateformes de Forces - Environnement Virtuel - Marche le long du Couloir sur un GAITRite	Système optoelectronique	Vitesse de marche. La symétrie de la longueur de pas. Durée de la phase d'appui	L'intégration d'un environnement virtuel en vue d'une réadaptation de personnes présentant une asymétrie de marche.	Le tapis roulant en mode haptique a tendance à symétriser le patron de marche et donc diminuer la variabilité. La première minute de marche sur tapis semble la plus asymétrique comparativement au reste de l'essai.
Gouelle et al., (2013)	123 personnes saines 127 personnes atteintes de L'ataxie de Friedreich	- Marche sur le sol (GAITRite)	N/A	1.Cadence. 2.Longueur de pas 3.Longueur de foulée. 4.Durée de la phase d'appui. 5.Durée de la phase d'envol 6.Durée de cycle. 7.Vitesse de marche 8.Durée du simple appui 9.Durée du double appui.	Quantifier la variabilité de la marche en utilisant la GVI (Gait variability index) chez les personnes saines et celles atteintes de l'Ataxie de Friedreich.	Chez les personnes saines, la moyenne du GVI des 9 paramètres spatio-temporels se situe à 100,3±7,6 Chez les personnes atteintes de l'Ataxie de Friedreich 70,4±7,9 ce qui est significativement bas.

Tableau 1.1 Synthèse de la revue de littérature (Suite)

Auteurs	Nombre de participants	Tapis / Corridor	Capture	Paramètres spatio-temporels analysés	Objectif de Recherche	Résultats
Slott et al., (2013)	19 participants sans	Tapis uni bande pourvue de plateforme de force	Système optoelectronique	Longueur de foulée Durée de cycle Vitesse de marche Largeur de pas.	Comparaison de la variabilité des paramètres spatio-tempo mode vitesse fixe et en mode auto	Différence minimale de la moyenne de la longueur de foulée entre les 2 modes (moins de 1%) et celle de la largeur de pas à 5,2% de différence en mode auto

Tableau 1.1 Synthèse de la revue de littérature (Suite)

Auteurs	Nombre de participants	Tapis / Corridor	Capture	Paramètres spatio-temporels analysés	Objectif de Recherche	Résultats
Yang et al., (2016)	54 personnes saines	Tapis roulant unibande Couloir long de 14 mètres.	Système optoelectronique	La largeur de pas. La longueur de pas. La vitesse de marche.	Comparer les moyennes des paramètres spatio-temporels de la marche dans les 2 conditions de marche.	La durée du double appui sur le tapis roulant est plus importante (0,21 s) que celle le long du couloir (0,19 s). Pas de différence notable de la durée de cycle entre les 2 conditions de marche (1,0 vs 1,05 s). Une longueur de pas moins importante sur le tapis (0,36 m) que celle mesurée le long du couloir (0,43 m). Une vitesse plus grande le long du couloir (1,41 m/s) par rapport à celle mesurée sur le tapis (1,15 m/s).

Il est à noter que l'ensemble des méthodes exposées dans cette revue de littérature répond à notre méthodologie de recherche et en partie à notre problématique. Il a été question d'acquisition des paramètres spatio-temporels, de la cinétique ainsi que de la cinématique dans un milieu contrôlé en utilisant le tapis roulant en mode vitesse fixe et en mode auto contrôlé ainsi que le long d'un corridor, sur une population saine et sur une autre présentant des altérations dans leurs manières de marcher (marche pathologique).

Des auteurs tels que Hausdorff., (2005), Oberg et al., (1993) et Hollman et al., (2015) ont quantifié ces paramètres spatio-temporels et ont proposé des méthodes d'analyse de la variabilité de la marche tel que le (CV).

Gouelle et al., (2013) ont proposé un article qui s'articulait autour de l'interprétation des paramètres spatio-temporels, de la symétrie de la marche ainsi que de la variabilité de la marche. Ils ont d'ailleurs proposé d'utiliser le Gait Variability Index (GVI) qui permettait de quantifier la variabilité intrinsèque de la marche d'une population saine et pathologique.

Plusieurs articles ont confronté les données recueillies de la marche sur le tapis roulant en mode vitesse fixe à celle le long d'un couloir. Hollman et al., (2015), Yang, (2016). D'autres auteurs telles que Sloot et al., (2013) ont comparé la marche sur tapis en mode auto contrôlé à celle de la marche sur tapis en mode vitesse fixe.

Nous pouvons affirmer que selon le tableau de synthèse que des auteurs tel que Stolze et al., (1997)., Alton et al., (1998) ainsi que Yang et al., (2016) partageaient l'idée que lors de la marche sur le tapis à vitesse fixe, les participants avaient tendance à augmenter leurs cadences et à diminuer leurs longueurs de pas contrairement à cela des auteurs tel que Lee et al., (2007), Hollman et al., (2015) n'avaient noté aucune différence notable voir très peu par rapport aux paramètres spatio-temporels mesurés aussi bien le long du couloir que sur le tapis roulant à vitesse fixe. Sloot et al., (2013) sont les seuls auteurs de cette revue de littérature qui se sont penchés sur la comparaison des paramètres spatio-temporels mesurés sur un tapis à vitesse fixe ainsi que sur un mode auto contrôlé, leurs conclusions allaient dans le sens où il y avait des différences mineures par rapport entre autres à la foulée, la cadence dans ces deux conditions de marche.

Notre travail de recherche apportera vraisemblablement une complémentarité intéressante aux travaux déjà réalisés dans le domaine de l'analyse des paramètres spatio-temporels, de leur variabilité d'une condition de marche à une autre s'agissant d'une population en bonne santé physique et mentale.

1.2.7 Énoncé de l'hypothèse de recherche :

L'hypothèse soumise ici est que les paramètres spatio-temporels acquis tels que la longueur de pas droit et gauche, la longueur de foulée, la cadence ainsi que la vitesse lors de la marche du participant sur le tapis en mode haptique ressemblent plus à la marche dans la condition naturelle (au sol) que celle sur le tapis à vitesse fixe. Lors de cette étude, on aura recours à des statistiques descriptives incluant des mesures de tendance centrale (la moyenne) et de dispersion (l'écart-type). Des tests statistiques plus poussés seront aussi utilisés pour étudier les différences entre les trois conditions de marche (marche naturelle au sol, tapis à vitesse fixe et tapis haptique) sur chacune des variables dépendantes et sur le (CV) de quatre paramètres spatio-temporels étudiés en utilisant une analyse de variance à mesures répétée

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

L'objectif principal de notre étude de recherche était d'évaluer la capacité du tapis roulant haptique à générer une marche dite « naturelle ». Pour cela, il s'agissait de caractériser et de comparer cette marche « naturelle » sur le sol avec celle observée sur un tapis roulant à vitesse fixe d'une part et à vitesse variable d'autre part.

Un objectif secondaire consistait à évaluer l'effet de la durée en fonction du mode de contrôle « haptique » sur la marche des participants (environ 05 minutes de marche).

Pour ce faire, nous avons mené une expérimentation avec 15 participants volontaires sains au cours de laquelle nous avons évalué les caractéristiques de la marche (paramètres spatio-temporels et leurs variabilités) dans trois conditions expérimentales : la marche naturelle le long d'un couloir de 59 mètres, la marche sur le tapis roulant à deux voies à vitesse fixe et à vitesse variable (mode haptique).

Le projet de recherche a été mené au sein du Laboratoire de recherche en Imagerie et Orthopédie (LIO) situé au Centre de Recherche du CHUM. Il a été aussi question de valider un outil de mesure du mouvement humain (Xsens). En effet, lors de la marche le long d'un corridor et sur le tapis roulant en mode vitesse fixe et en mode haptique, les participants seront dotés de ce dernier.

Sur le tapis roulant à double voie doté de plateformes de forces de type AMTI, les paramètres spatio-temporels ont été enregistrés par le système optoélectronique de capture de mouvement (Vicon) en même temps que le système inertiel Xsens.

Après avoir réalisé les acquisitions par ces deux outils de mesure et le traitement de données des paramètres spatio-temporels, une analyse a été effectuée afin de confronter les résultats de ces deux outils de mesures entre eux.

Nous partons du principe que si les données recueillies par les deux systèmes de capture du mouvement (Xsens, Vicon) sont similaires ou que l'écart est minime, sachant que le Vicon

demeure l'outil de mesure de référence, d'une très grande précision et de fiabilité (Gold Standard), nous pourrions ainsi en déduire que les données recueillies par le système inertiel Xsens lors des acquisitions le long du corridor et sur le tapis roulant peuvent être validées et peuvent être alors analysées et confrontées aux résultats des études exposées plus haut dans la revue de littérature.

2.1 Les participants

2.1.1 Le recrutement

Notre population était composée de 15 personnes : 8 femmes et 7 hommes dont l'âge variait entre 22 et 55 ans, présentant une taille qui variait entre 1,53m et 1,87m. Il s'agissait d'une population saine ne présentant aucune pathologie connue. Les participants ont été recrutés par le biais d'affiches déposées au Centre de Recherche du Centre Hospitalier Universitaire de l'hôpital de Montréal (CRCHUM) et à l'École de Technologie supérieure (ÉTS).

Ce projet de recherche a eu l'approbation du comité d'éthique de l'ÉTS ainsi que celui du Centre Hospitalier Universitaire de l'hôpital de Montréal (CHUM).

Les participants ont d'abord lu le Formulaire d'Information et de Consentement puis ont signé ce dernier. Les tableaux suivants présentent les caractéristiques anthropométriques de chaque participant classé par sexe :

Tableau 2.1 Caractéristiques anthropométriques chez les femmes (n=8).

08 Femmes	Age(ans)	Taille(m)	Poids(kg)	Longueur du membre inférieur (m)
Pa01	35	1,57	57,5	0,8
Pa03	21	1,75	64	0,91
Pa06	24	1,73	62,6	0,89
Pa09	25	1,69	89	0,89
Pa12	22	1,7	64,4	0,87
Pa13	24	1,63	56	0,89
Pa14	22	1,73	72	0,9
Pa15	28	1,52	59	0,83
Moyenne	25,13	1,67	65,56	0,87
Écart type	4,55	0,08	10,71	0,04

La moyenne d'âge des femmes était de $25,1 \pm 4,55$ ans, leurs poids se situait à $65 \pm 10,7$ kg. La taille se situait à $1,67 \pm 0,08$ mètres. La moyenne de la longueur du membre inférieur était de $0,87 \pm 0,04$ m.

Tableau 2.2 Caractéristiques anthropométriques chez les hommes (n=7)

07 Hommes	Age(ans)	Taille(m)	Poids(kg)	Longueur du membre inférieur (m)
Pa02	40	1,73	83	0,89
Pa04	22	1,87	100	0,96
Pa05	25	1,8	76,65	0,91
Pa07	22	1,78	62,5	0,9
Pa08	24	1,75	81	0,92
Pa10	22	1,75	59,4	0,88
Pa11	55	1,8	74	0,96
Moyenne	30	1,78	76,65	0,92
Écart-type	12,77	0,05	13,60	0,03

La moyenne d'âge des hommes était de $30 \pm 12,77$ ans, leurs poids se situaient à $76,35 \pm 13,6$ kg. La taille variait de $1,78 \pm 0,05$ m. La moyenne de la longueur du membre inférieur était de $0,92 \pm 0,03$ m.

2.1.2 Les critères d'inclusion et d'exclusion des participants

2.1.2.1 Les critères d'inclusion

Les participants devaient être âgés de 18 et 55 ans. Ils ne devaient souffrir d'aucune pathologie, qu'elle soit psychique (ex : maladie mentale à titre indicatif) ou physique (ex. infirmité ou personne appareillée à titre indicatif). Les participants devaient être capables d'effectuer un effort modéré, typiquement être capable de marcher pendant 30 minutes en continu sur un tapis roulant à vitesse confortable et en mode vitesse haptique

2.1.2.2 Les critères d'exclusion

Les participants devaient avoir eu aussi :

- Une douleur chronique qu'elle soit d'expression diurne, nocturne ou au changement de position ;

- Des lésions d'ordre articulaire (synovite, coxarthrose, gonarthrose, entorse d'une ou des deux chevilles, etc.) ;
- Une insuffisance respiratoire chronique ;
- Une insuffisance cardiaque qu'elle soit droite ou gauche. - Souffrir de cardiopathies obstructives ;
- Des antécédents d'infarctus du myocarde ;
- Un traitement médical chronique (Hypertension artérielle, diabète type I ou II à titre d'exemple) ;
- Une hypotension orthostatique (à la position debout) ;
- Des troubles de l'équilibre par atteinte de l'oreille interne ;
- Des troubles cognitifs (trouble mental qui affecte plus particulièrement et principalement la mémoire) ;
- Des troubles psychiatriques (maladie psychiatrique : schizophrénie, confusion mentale, délire, etc.) ;
- Un traitement médical affectant la vigilance ;
- Pour les femmes dont la grossesse est connue (impossibilité d'utiliser le harnais de sécurité à la marche).

2.1.3 Soumission des formulaires d'information et de consentement du protocole

Avant toute expérimentation, un formulaire d'information et de consentement du protocole, joint en annexe III, a été soumis aux participants, ce dernier devait être lu, approuvé et signé le cas échéant. Ce questionnaire renseignait les participants sur le déroulement des acquisitions, leur durée et la manière dont les participants devaient marcher dans les trois conditions de marche.

2.2 Le déroulement expérimental

2.2.1 Marche le long d'un couloir

Dans un premier temps, le participant sera doté d'un harnais de sécurité (Il sera mis durant toute la durée des acquisitions) ainsi que des capteurs inertiels, une calibration de ces derniers devra être effectuée avant chaque acquisition puis suivra une mesure des caractéristiques spatio-temporelles de la marche le long d'un couloir mesurant 59 mètres de

long situé à proximité du (LIO). Ces mesures ont été enregistrées à l'aide d'un système de capteurs inertiels à l'avantage de permettre une mesure ambulatoire (Xsens, Inc).

2.2.1.1 Habillage du participant et positionnement des capteurs inertiels du Xsens

Avant de faire marcher le participant le long du couloir, ce dernier était pourvu de sept capteurs inertiels type Xsens : un fixé au niveau de la région lombaire, un fixé au niveau du tiers supérieur de la région latérale de la jambe droite et gauche et enfin un capteur situé au niveau du tiers supérieur de la région latérale droite et gauche de la cuisse et enfin un sur le dos du pied droit et gauche. Le participant a aussi été pourvu de deux X bus (boîtier de commande relié par voie filaire aux différents capteurs disposés au niveau des différents segments des deux membres inférieurs) ainsi que d'un harnais de sécurité. Une période d'adaptation de cinq minutes était proposée avant l'enregistrement afin de familiariser les participants à la tâche et à l'équipement.

On a demandé aux participants d'effectuer par la suite quatre allers consécutifs le long d'un couloir de marche, la seule consigne à leurs égards était de marcher le plus naturellement possible comme en temps normal au quotidien. La distance totale de marche était égale à 236 mètres.



Figure 2.1 Participante dotée du système de capteurs inertiels, des plaques dotées de marqueurs réfléchissants ainsi que du harnais de sécurité

2.2.1.2 Calibration du système X sens

Durant l'étape de calibration du système inertiel, le participant se place au centre du tapis roulant AMTI (figure 3.1), il adoptera une attitude posturale nommée N pose (les membres supérieurs sont situés le long du corps). Le participant doit être à ce moment-là immobile pour lancer la calibration, cette dernière devra être répétée autant de fois que nécessaire jusqu'à ce que cette dernière soit de bonne qualité (le moins de perturbations magnétiques) afin qu'elle soit retenue aux vues des différentes acquisitions.

2.2.1.3 Vérification rapide des données acquises sur corridor

Une fois les quatre essais le long du couloir réalisés, les fichiers (mvn) sont convertis en format (mvnx) ; un logiciel (Check X sens) permet d'avoir une estimation sur les acquisitions des paramètres spatio-temporels obtenues le long du couloir en nous affichant un graphique représentant le nombre de pas droits et gauches ainsi que les moyennes, les écarts, les limites de la variabilité normale ainsi que la vitesse de marche moyenne estimée.

Par la suite, le participant sera appelé à marcher sous cette contrainte (vitesse moyenne estimée) durant cinq minutes et apprécier si cette vitesse lui est confortable, cette fois-ci sur un tapis roulant en mode vitesse fixe.

Cette dernière sera prise comme référence au cours de la phase de marche sur tapis roulant en mode vitesse fixe et sera considérée comme vitesse de départ à imposer au participant au début de cette même phase.

Les deux tableaux suivants expriment la moyenne de la vitesse de marche le long du couloir tel que mesuré par le X sens (moyenne des quatre essais de marche). Cette vitesse moyenne avait servi dans un second temps comme vitesse de départ (\pm) afin de déterminer la vitesse confortable pour chaque participant lors de la marche sur tapis roulant à vitesse fixe chez les femmes et les hommes :

Tableau 2.3 Moyenne de la vitesse le long du couloir et sur tapis roulant à vitesse fixe chez les femmes

8 Femmes.	V couloir estimée par Check X sens	Vitesse du Tapis en VF
Pa01	0,90 m/s	0,95 m/s
Pa03	1,23	1,6
Pa06	1,45	1,3
Pa09	1,15	1,15
Pa12	1,3	1
Pa13	1,45	1,35
Pa14	1,15	1,1
Pa15	0,9	0,9
Moyenne	1,23	1,20
Écart-type	0,19	0,24

La moyenne de la vitesse estimée chez les femmes le long du couloir par X sens était de 1,23 \pm 0,19 m/s tandis que celle du tapis à vitesse fixe était de 1,20 \pm 0,2 m/s.

Tableau 2.4 Moyenne de la vitesse le long du couloir et sur tapis roulant à vitesse fixe chez les hommes

7 Hommes	V couloir estimée par Check X sens	Vitesse du Tapis VF
Pa02	1 m/s	1,3
Pa04	1,26	1,35
Pa05	1,25	1,2
Pa07	1,2	1
Pa08	1,2	1,2
Pa10	1.15	0,95
Pa11	1.22	1,05
Moyenne	1,18	1,15
Écart-type	0,11	0,15

La moyenne de la vitesse estimée chez les hommes le long du couloir estimé par Check Xsens était de $1,18 \pm 0,11$ m/s tandis que la moyenne de la vitesse du tapis à vitesse fixe était de $1,15 \pm 0,15$ m/s.

2.2.2 Marche sur tapis roulant AMTI à deux voies

Dans un deuxième temps, les mesures de ces mêmes paramètres ont été faites sur un tapis roulant à deux voies de type AMTI équipé de plateformes à six degrés de liberté pour chaque voie. Les paramètres ont été enregistrés par un système de capture du mouvement à 12 caméras optoélectroniques en 3D (Nexus, VICON®) et par le système de capteurs inertiels X sens.

2.2.2.1 Positionnement des marqueurs de capture de mouvement VICON

Dans un deuxième temps, ces mêmes participants ont été munis de plaques dotées de marqueurs réfléchissants situés au-dessus des capteurs inertiels du système Xsens précédemment fixé.

2.2.2.2 Probage anatomique des segments articulaires du corps entier

Cette méthode est utilisée grâce à un pointeur pourvu de marqueurs réfléchissants passifs afin de situer dans l'espace des points anatomiques des principaux segments osseux du corps humain, se situant : au niveau de la tête : Vertex, os nasal et septième vertèbre cervicale (C7). Au niveau du thorax et du bassin : Manubrium, appendice xiphoïde,

cinquième vertèbre lombaire (L5). Au niveau du membre supérieur droit et gauche : Acromions, épicondyles huméraux latéraux et médians, processus styloïdes du radius et de l'ulna, deuxièmes et cinquièmes métacarpes.

Au niveau du membre inférieur droit et gauche : Épines iliaques antérosupérieures et postéro supérieures, grands trochanters, condyles latéraux et médians du fémur, malléoles externes et internes, talons, deuxièmes et cinquièmes métatarses.

Ces points sont captés par les 12 caméras (Vicon), cela produit une représentation 3D d'un avatar. Cette méthode nous a aidés à traiter les données recueillies lors des différentes acquisitions sur le tapis roulant afin d'estimer les paramètres spatio-temporels étudiés : longueur de pas, vitesse de marche, cadence et vitesse de marche.

2.2.2.3 Échauffement et choix de la vitesse de marche de confort

Les participants devaient marcher sur un tapis roulant instrumenté pendant une période d'adaptation d'environ cinq minutes à vitesse constante. Cette vitesse, dite confortable était établie selon un procédé sélectif développé au LIO : on avait démarré à une vitesse de marche déjà prédéterminée à la marche le long du couloir comme cela a été expliqué précédemment et on incrémentait cette vitesse graduellement de 0.05 m/s jusqu'à ce que le participant ait décidé d'une vitesse qui lui était confortable. Ce choix était bien entendu subjectif. L'opérateur faisait varier la vitesse en fonction du ressenti de chaque participant en l'augmentant ou en la diminuant de 0.05 m/s afin de trouver une vitesse de confort. Une période d'adaptation de cinq minutes était nécessaire aux participants pour se familiariser à la marche sur le tapis. S'en suivait une phase de test pendant laquelle le participant devait marcher à cette vitesse constante pendant 5 minutes.

2.2.2.4 Exercices de marche sur tapis roulant AMTI à deux voies à vitesse fixe

Une fois la vitesse de confort fixée, les participants devaient marcher sur le tapis roulant pourvu de capteurs inertiels et des plaques où étaient fixés les marqueurs réfléchissants. Ils étaient attachés à un harnais de sécurité qui était lui-même fixé à un crochet au plafond. Les participants devaient marcher cinq minutes de suite suivie d'une acquisition des deux dernières minutes de l'essai de marche par le système Vicon et par le système Xsens en même temps.

2.2.2.5 Exercices de marche sur tapis roulant AMTI à deux voies en mode haptique

Pour finir, les participants toujours attachés au harnais de sécurité, devaient marcher de la manière la plus naturelle possible sur le tapis roulant en mode de fonctionnement haptique sur les deux voies du tapis qui normalement s'ajusteraient automatiquement à leurs démarches grâce aux contacts des pieds sur les plateformes de force situées sous les deux courroies du tapis. Là aussi une période d'adaptation de cinq minutes était nécessaire avant l'acquisition. La vitesse initiale de marche était fixée à 0.5 m/s en mode vitesse fixe, puis l'opérateur basculait en mode haptique en prévenant le participant de ce changement. S'en suivait une acquisition de deux minutes par le système optoélectronique (Vicon) et le système (Xsens) en même temps.

2.2.2.6 Soumission des questionnaires qualitatifs sur la marche le long du couloir VS marche sur un tapis roulant à la fin de l'expérimentation

Ce questionnaire composé de 13 questions était soumis à chaque participant à la fin des trois acquisitions, cela nous permettait d'avoir un retour d'expérience sur le ressenti de chacun quant à l'expérience vécue. Ce questionnaire a été analysé à la fin du chapitre 4 (discussion) et a été mis en annexe IV.

2.3 Analyse statistique des paramètres spatio-temporels mesurés

Lors de cette étude, on a eu recours à des statistiques descriptives incluant des mesures de tendance centrale (la moyenne) et de dispersion (l'écart-type). On a mesuré le CV de la marche sur quatre paramètres spatio-temporels : la longueur de pas, la longueur de foulée, la cadence ainsi que la vitesse de marche dans les trois conditions de marche.

Une analyse statistique de type ANOVA a été effectuée en utilisant le logiciel SPSS version 25, afin de confronter trois conditions de marche différentes : la marche le long d'un couloir, la marche sur un tapis roulant à vitesse fixe et enfin la marche sur un tapis en mode haptique ; cela dans le but de confirmer ou d'infirmer l'existence d'une différence significative ou non entre lesdites conditions après correction des perturbations en mode haptique rencontrées lors des acquisitions de la marche sur le tapis en mode haptique.

2.4 Correction des perturbations survenue lors des acquisitions en mode haptique

En effet cette correction avait concerné les participants qui présentaient le plus de variabilité et donc le moins de contrôle par la même occasion du tapis en mode haptique. Nous nous sommes d'ailleurs limités à huit participants et pris comme situation de référence de la variabilité de la marche ; le CV de la longueur de pas allant de 10 à 25 %. Cette perturbation était due à une anomalie au niveau de la régulation de la vitesse du tapis en mode haptique, d'ailleurs nous avons eu à constater par la suite que la vitesse qui était censée être envoyée par l'intermédiaire de Simulink (Matlab) aux deux moteurs du tapis roulant ne prenait pas effet en temps réel et donc le participant avait la contrainte de marcher sur le tapis avec une vitesse calculée en fonction de sa longueur de pas précédente, d'où la perturbation au niveau du contrôle du tapis (ralentissement voir accélération).

Cette correction des perturbations en mode haptique a été réalisée de manière automatique grâce à la programmation et à l'exécution d'un script sous environnement Matlab prenant comme référence l'intervalle cernant l'écart-type supérieur et inférieur autour de la moyenne de l'essai de marche en condition haptique pour chaque variable spatio-temporelle étudiée tout en prenant en compte par la même occasion la variabilité de la marche le long du couloir considéré comme la situation de référence.

Notre méthode de correction des perturbations en mode haptique consistait à prendre en considération les valeurs situées entre les deux écarts-types cernant de part et d'autre la moyenne. A ce moment-là une nouvelle moyenne sera générée ainsi qu'un nouvel écart-type comme illustré ci-dessous :

Nous avons pris à titre d'exemple le participant 1 ; la moyenne de la longueur de pas droite sur le tapis en mode haptique était de 0,57 m avant la correction avec un écart-type de 0,12 contre une moyenne après correction qui était chiffrée à 0,60 m et un écart-type de 0,06.

Cette correction avait concerné aussi les trois autres paramètres spatio-temporels : la longueur de foulée, la cadence ainsi que la vitesse de marche. De ce fait, une nouvelle moyenne des essais de marche en mode haptique avait été générée ainsi qu'un nouvel écart-type, ce qui nous avait permis de recalculer un nouveau CV que nous avons confronté au CV avant la correction des perturbations. Nous avons pris à titre d'exemple toujours le participant 1, son CV de la longueur de pas droite avant la correction était de 21% et celle après correction était

chiffrée à 10%. Cela nous amène à conclure que cette méthode de correction des perturbations a réduit la variabilité d'environ 50%. Cela reste valable pour les sept autres participants concernés par cette même méthode de correction.

Nous nous sommes servi des analyses de variance (ANOVA) et avons apprécié si cela avait eu ou pas un effet significatif sur les résultats statistiques, de même que la comparaison des cycles de marche des quatre paramètres spatio-temporels avant et après la correction de données de ces mêmes participants.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Dans cette section nous présenterons les résultats recueillis lors des différentes acquisitions décrites dans la partie méthodologie (chapitre 2), à savoir : la marche le long d'un couloir à vitesse confortable (vitesse naturelle), la marche sur un tapis roulant instrumenté à deux voies en mode vitesse fixe et enfin la marche sur un tapis roulant en mode haptique (vitesse auto contrôlée par le participant lui-même).

3.1 Les paramètres spatiaux

Parmi les paramètres spatiaux collectés lors des différentes acquisitions, deux d'entre eux ont été étudiés, car ces derniers revenaient le plus dans la littérature. Il s'agit de la mesure de la longueur de pas (L_P) et de la longueur de foulée (L_F) dans les trois conditions de marche citées ci-dessus.

3.1.1 Mesure de la longueur de pas droit et gauche par le système de capteurs inertiels (X sens) dans les trois conditions de marche

3.1.1.1 Mesure de la moyenne de la longueur de pas droit et gauche

Voir les données dans Tableau-A I-1

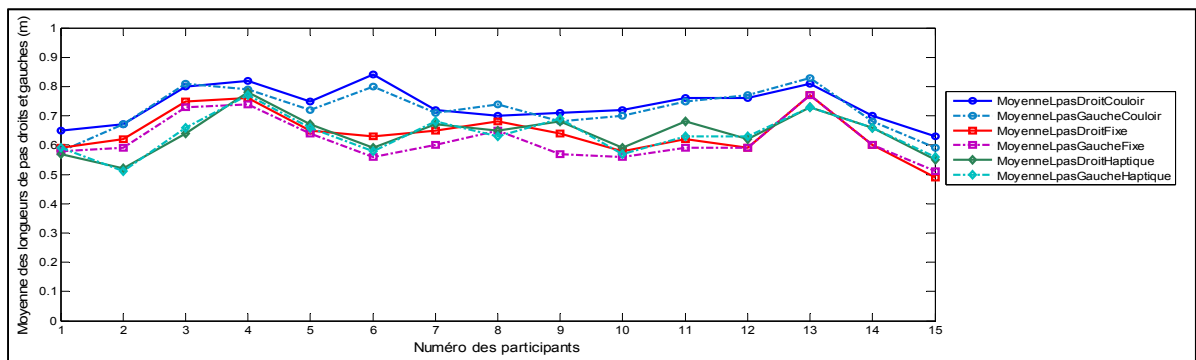


Figure 3.1 Moyenne de longueurs de pas droits et gauches dans trois conditions de marche des 15 participant

La figure 3.1 illustre les moyennes des longueurs de pas droits et gauches chez les 15 participants, nous avons pu constater que la longueur de pas droit et gauche le long du couloir était plus élevée que celle enregistrée sur le tapis à vitesse fixe et en mode haptique, respectivement ($L_p D = 0,74$ m ; $L_p G = 0,72$ m) ; ($L_p D = 0,64$ m, $L_p G = 0,62$ m) ; ($L_p D = 0,64$ m, $L_p G = 0,63$ m). Il existait donc une différence significative entre la condition couloir comparativement à celle de la condition tapis à vitesse fixe et à celle du tapis en mode haptique.

3.1.1.2 ANOVA de la moyenne des longueurs de pas droit et gauche dans trois conditions de marche après correction des perturbations des données en mode haptique

Nous avons pu retenir qu'il n'existait pas de différence significative par rapport à la moyenne des longueurs de pas droit et gauche confrontées aux trois conditions de marche. Par conséquent, il n'y avait pas d'effet côté par changement de condition.

Tableau 3.1 ANOVA des moyennes des longueurs de pas dans les trois conditions de marche

Paramètres	Conditions		
	Couloir	Tapis vitesse fixe	Tapis mode haptique après correction des perturbations
Moyenne des longueurs de pas droits et gauches (m) des 15 participants	$0,73 \pm 0,07$	$0,63 \pm 0,07$ *	$0,65 \pm 0,07$ *

(*) indique une différence hautement significative entre la condition du tapis à vitesse fixe et le couloir ($p < 0.001$) et une différence significative entre la condition tapis haptique et le couloir ($p < 0.01$).

Nous avons pu conclure qu'il n'y avait pas de différence significative entre la condition de marche sur le tapis à vitesse fixe par rapport à celle en mode haptique après correction des perturbations.

3.1.1.3 Mesure du CV de la longueur de pas droit et gauche dans les trois conditions de marche :

Le CV est défini comme le rapport de l'écart-type à la moyenne. En effet plus le CV a une valeur élevée, plus la dispersion autour de la moyenne est grande.

Voir les données dans Tableau-A I-2.

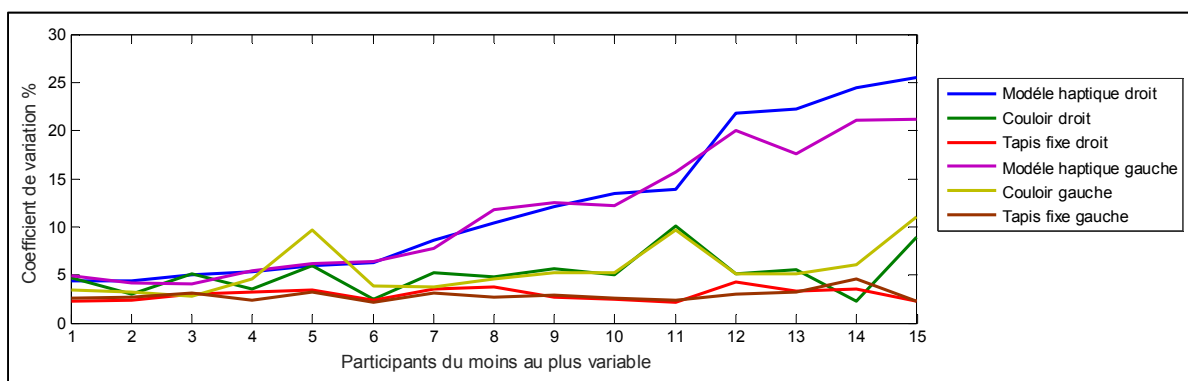


Figure 3.2 CV de la longueur de pas droit et gauche dans les trois conditions de marche considérée du moins au plus variable en mode haptique

Nous avons remarqué sur la figure 3.2 que le CV de la longueur de pas droit et gauche en mode haptique se rapprochait de celle de la condition de marche le long du couloir, et ce par rapport aux sept premiers participants, qui étaient considérés comme les moins variables, par rapport au reste des participants. Ces participants ont été classés du moins au plus variable en mode haptique (participants 11,9,5,12,14,4,15,8,10,2,13,1,7,6 et 3).

Par ailleurs tous les participants marchant sur le tapis à vitesse fixe, avaient présenté une variabilité moindre (entre 2,12% et 4,33%) que celle mesurée le long du couloir (entre 2,82 et 9,63%) et du tapis en mode haptique se situant (entre 4,03% et 21,22%).

3.1.1.4 ANOVA du coefficient de variation des longueurs de pas droit et gauche

Il n'y a pas de différence significative entre la marche le long du couloir et celle sur le tapis en mode haptique après correction des perturbations. Cependant, il existe une différence modérément significative entre la condition (couloir vs tapis à vitesse fixe) et une différence hautement significative entre la condition (tapis à vitesse fixe vs mode haptique) après la

correction des perturbations en mode haptique comme illustrée à travers le tableau ci-dessous.

Tableau 3.2 ANOVA des CV des longueurs de pas dans les trois conditions de marche

Paramètres	Conditions		
	Couloir	Tapis vitesse fixe	Tapis mode haptique après correction des perturbations
Moyenne des CV des longueurs de pas droits et gauches (%) des 15 participants	4,99 ± 1,71	2,93 ± 0,56 *	7,40 ± 3,09 ^π

(*) indique une différence significative entre la condition du tapis fixe et le couloir ($p < 0.05$).

(Pi) indique une différence hautement significative entre la condition du tapis à vitesse fixe et le mode haptique ($p < 0.001$).

3.1.1.5 Correction des perturbations en mode haptique des huit participants les plus variables concernant la longueur de pas droit et gauche

Le tableau-A I-3, exprime le CV de la longueur de pas droit et gauche dans les trois conditions de marche avec correction des perturbations en mode haptique concernant les huit participants les plus variables.

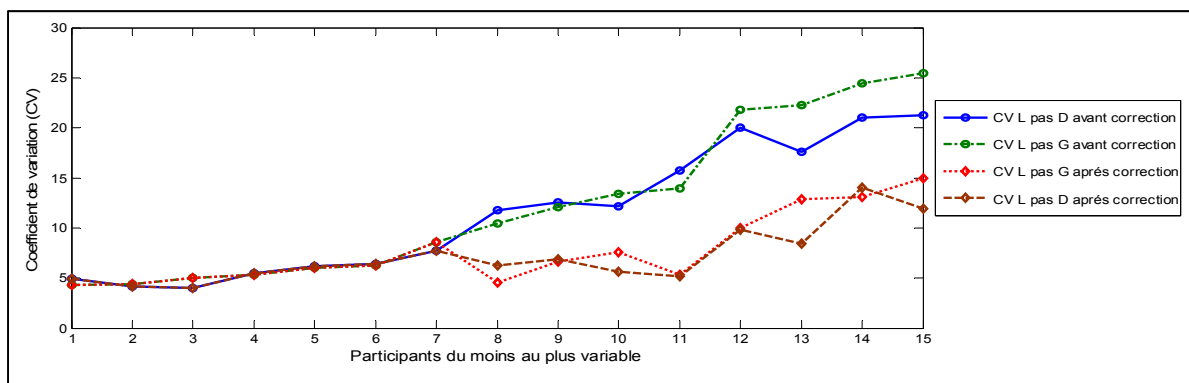


Figure 3.3 Évolution du CV de la longueur de pas droit et gauche sur le tapis avant et après correction des perturbations en mode haptique des huit participants

Nous avons remarqué sur la figure ci-dessus que le CV de la longueur de pas droit et gauche avait chuté pratiquement de 50 % après la correction des perturbations en mode haptique pour les 8 participants les plus variables. Cette figure présente l'agencement des participants dans l'ordre qui suit : participants 11,9,5,12,14,4,15,8,10,2,13,1,7,6 et 3 (du moins au plus variable).

Les figures suivantes expriment l'évolution de la longueur de pas droit et gauche en mode haptique avant et après correction des perturbations, concernant le participant 01 (à titre d'exemple).

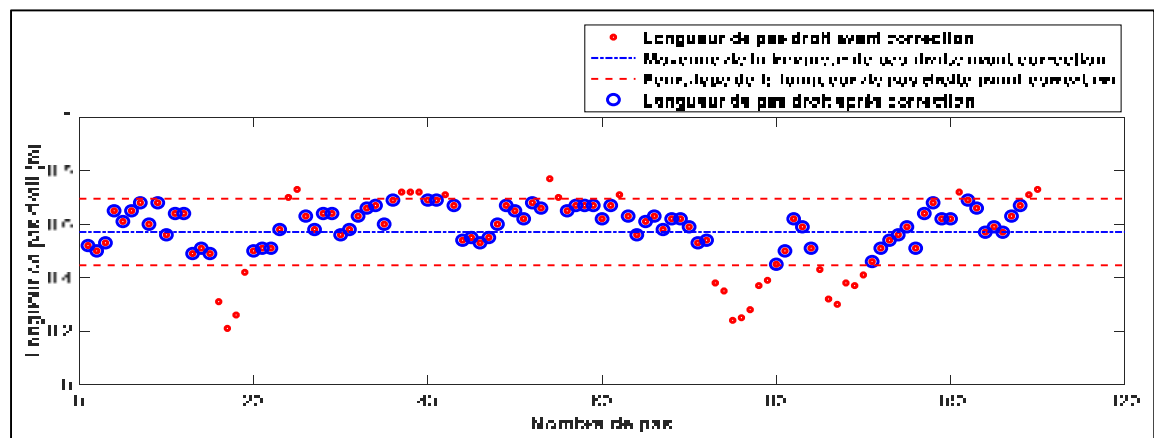


Figure 3.4 Longueurs de pas droits avant et après correction des perturbations en mode haptique chez le participant 1

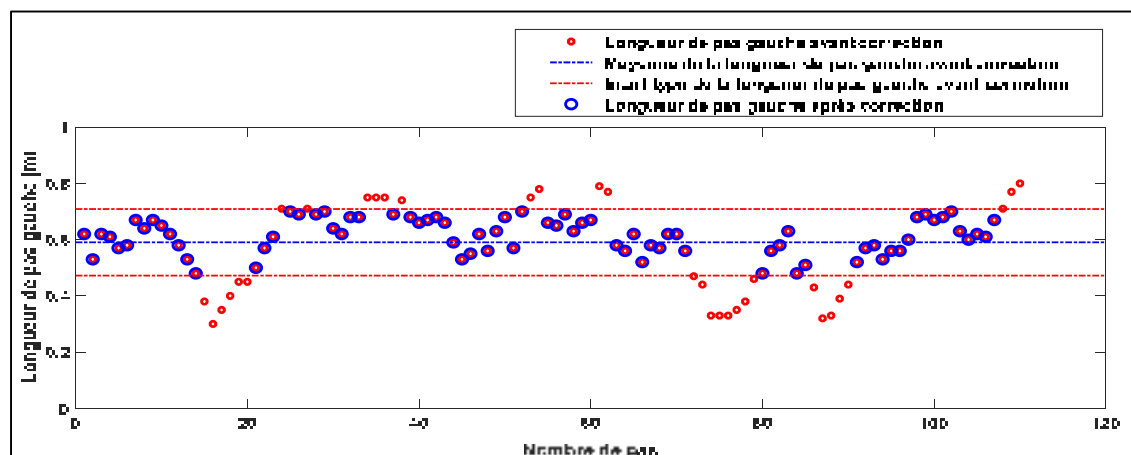


Figure 3.5 Longueurs de pas gauches avant et après correction des perturbations en mode haptique chez le participant 1

Nous avons constaté sur la figure ci-dessus qu'il y a moins de variabilité de la longueur de pas gauche (par exemple) après correction des perturbations, d'ailleurs le CV passe de 21,82% à 9,84% (chute de près de 50%).

3.1.2 Mesure de la longueur de foulée par le système de capteurs inertiels (Xsens) dans les 3 conditions de marche

3.1.2.1 Mesure de la moyenne de la longueur de foulée

Voir Tableau-A I-5

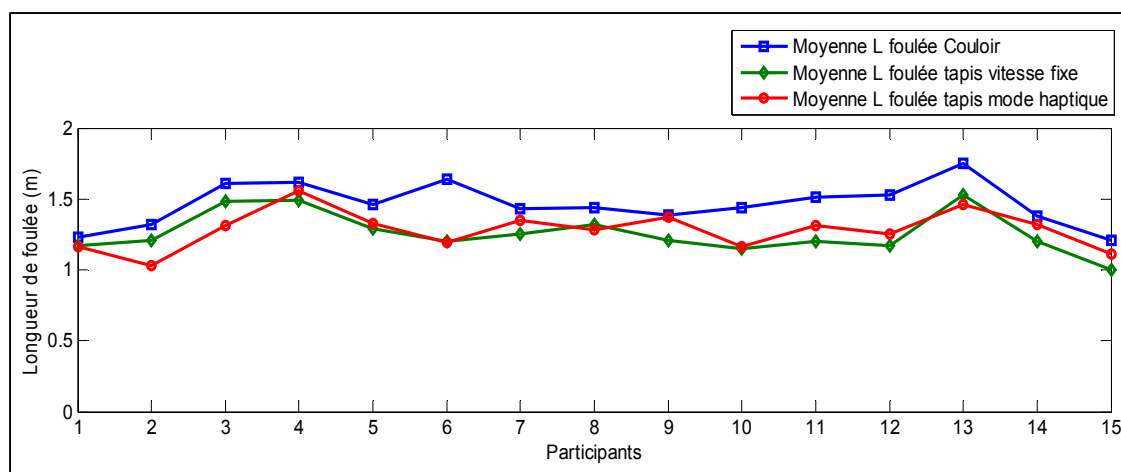


Figure 3.6 Moyenne des longueurs de foulée dans trois conditions de marche des 15 participants

Nous avons pu constater sur la figure ci-dessus illustrant la moyenne des longueurs de foulées chez les 15 participants, que celles mesurées le long du couloir, demeurent les plus élevées respectivement (1,47 m) comparativement à celles enregistrées sur le tapis à vitesse fixe respectivement (1,26 m) et en mode haptique respectivement (1,28 m).

Par conséquent, la longueur de foulée diminue lors de la marche sur le tapis à vitesse fixe et en mode haptique par rapport à celle mesurée le long du couloir.

3.1.2.2 ANOVA de la moyenne des longueurs de foulée après correction des perturbations des données en mode haptique

Tableau 3.3 ANOVA de la moyenne des foulées après correction des perturbations en mode haptique

Paramètres	Conditions		
	Couloir	Tapis vitesse fixe	Tapis mode haptique Après correction des perturbations
Moyenne de la longueur de foulée (m) des 15 participants	1,46 ± 0,15	1,26 ± 0,14 *	1,30 ± 0,14 *

(*) indique une différence hautement significative ($p < 0.001$) entre (couloir vs tapis à vitesse fixe) et une différence significative ($p < 0.01$) entre (tapis à vitesse fixe vs mode haptique).

Il existe donc une différence hautement significative de la moyenne de la longueur de foulée dans la condition (couloir vs tapis à vitesse fixe) et une différence significative dans la condition (couloir vs mode haptique). Il n'existe pas de différence significative dans la condition (tapis à vitesse fixe vs mode haptique).

3.1.2.3 Mesure du CV de la longueur de foulée

Voir Tableau-A I-5

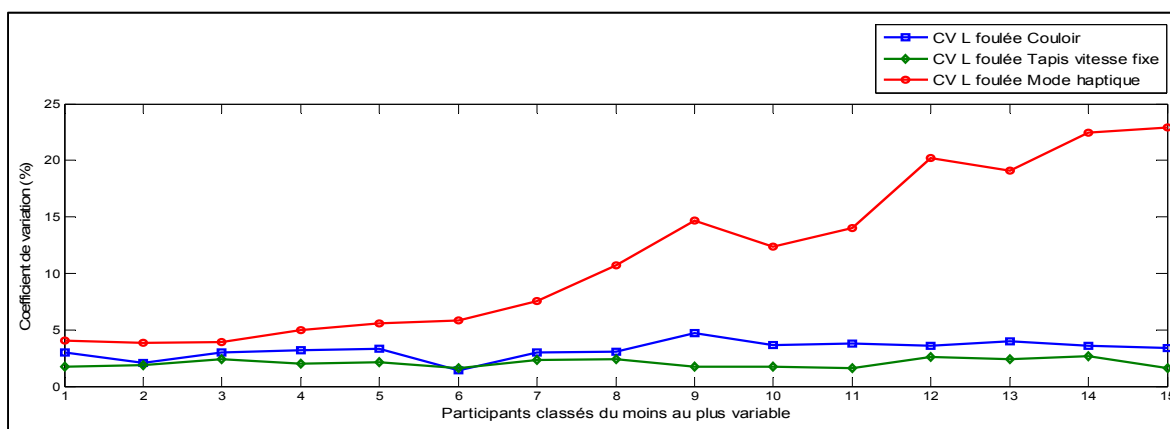


Figure 3.7 Évolution du coefficient de variation de la longueur de foulée dans les trois conditions de marche du moins au plus variable en se basant sur variabilité de la longueur de pas en mode haptique

Sur la figure ci-dessus, le CV de la longueur de foulée en mode haptique se rapprochait de celui de la condition de marche le long du couloir et ce par rapport aux sept premiers participants, qui étaient considérés comme les moins variable par rapport au reste des participants.

Par ailleurs, tous les participants marchant sur le tapis à vitesse fixe avaient présenté une variabilité moindre (1,61% et 2,64%) que celle mesurée le long du couloir (entre 2,06% et 4,73%) et du tapis en mode haptique se situant (entre 3,85% et 22,91%).

3.1.2.4 ANOVA du CV de la foulée

Tableau 3.4 ANOVA du CV de la longueur de foulée

Paramètres	Conditions		
	Couloir	Tapis vitesse fixe	Tapis mode haptique Après correction des perturbations
Moyenne des CV de la longueur de foulée (%) des 15 participants	3,26 ± 0,77	2,07 ± 0,38 *	6,97 ± 3,31 * ^π

(*) indique une différence hautement significative entre la condition du tapis vitesse fixe vs couloir et la condition tapis vitesse fixe vs haptique. ($p < 0.001$).

(Pi) indique une différence significative entre la condition du couloir vs le mode haptique ($p < 0.01$).

Il existe donc une différence hautement significative entre les CV de la condition du tapis à vitesse fixe vs couloir et la condition du tapis à vitesse fixe vs haptique. Par ailleurs il existe une différence significative entre la condition du couloir vs le mode haptique après correction des perturbations en mode haptique.

3.1.2.5 Correction des perturbations en mode haptique des huit participants les plus variables concernant la longueur de foulée

Le tableau-A I-6 exprime le CV de la longueur de foulée dans les trois conditions de marche avec correction des perturbations en mode haptique concernant les huit participants les plus variables.

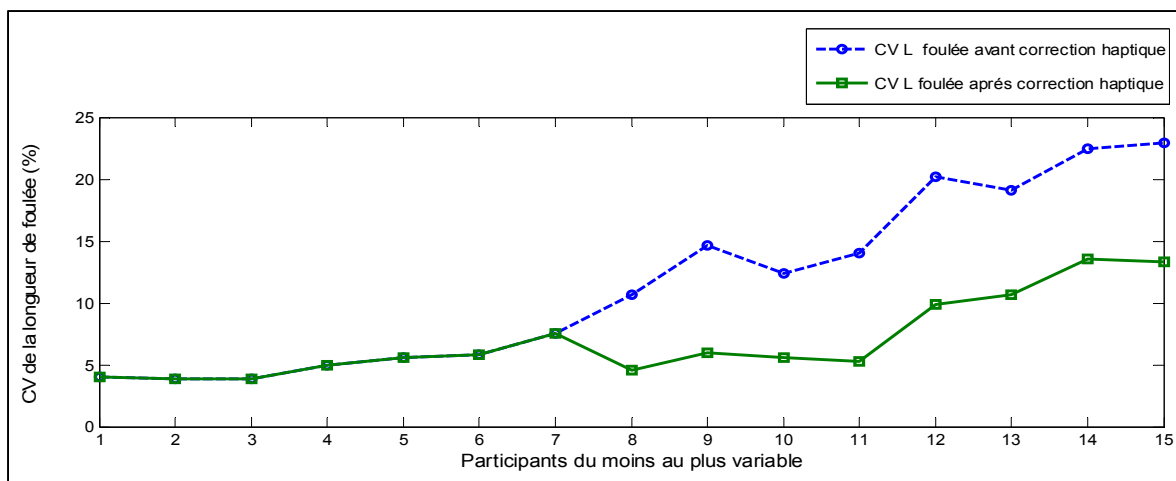


Figure 3.8 Évolution du CV de la longueur de foulée sur le tapis avant et après correction des perturbations en mode haptique de 8 participants

Nous avons remarqué que le CV de la longueur de foulée avait chuté pratiquement de 50 % après la correction des perturbations en mode haptique pour les huit participants les plus variables.

La figure suivante exprime l'évolution de la longueur de foulée en mode haptique avant et après correction des perturbations, concernant le participant 1 (à titre d'exemple).

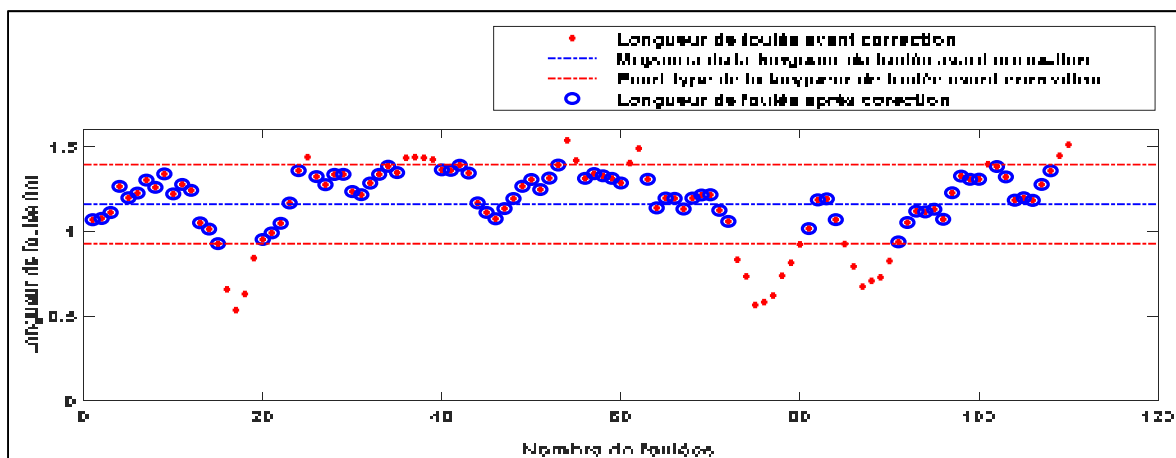


Figure 3.9 Longueurs de foulée avant et après correction des perturbations en mode haptique chez le participant 1

Nous pouvons constater sur la figure ci-dessus qu'il y a moins de variabilité de la longueur de foulée après correction des perturbations, d'ailleurs le CV passe de 20,22% à 9,92% (chute de près de 50%).

3.2 Les paramètres temporels

Dans cette section deux paramètres temporels ont été étudiés ; cela avait concerné la mesure de la cadence (C) exprimée en nombre de pas par minute et la vitesse de marche exprimée à son tour en mètre par seconde toujours dans les trois conditions de marche citées en début du chapitre 3.

3.2.1 Mesure de la cadence par le système de capteurs inertiels (Xsens) dans les trois conditions de marche

3.2.1.1 Mesure de la moyenne de la cadence

Voir tableau-A I-7 illustrant la moyenne de la cadence chez les 15 participants dans les trois conditions de marche

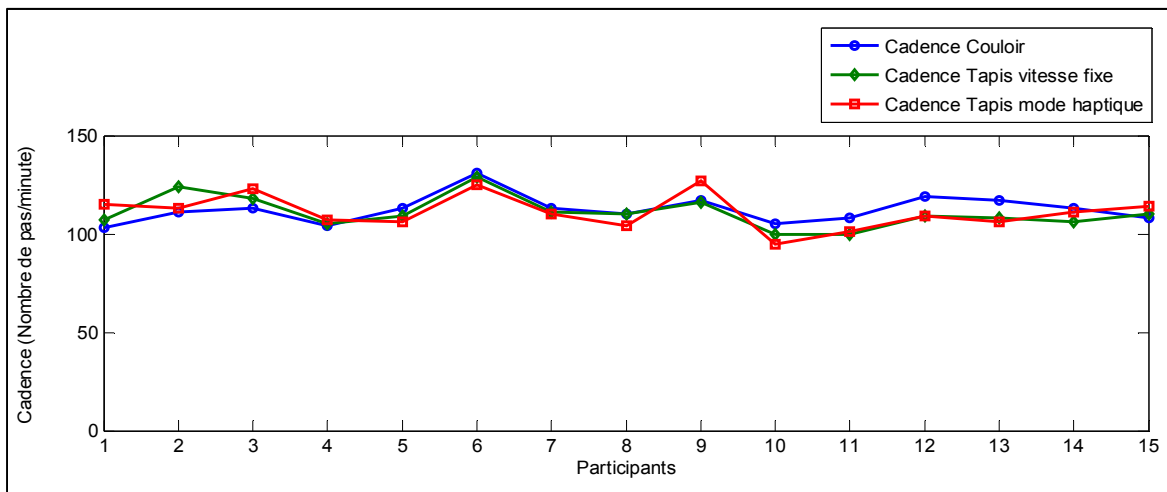


Figure 3.10 Moyenne de la cadence des 15 participants dans 3 conditions de marche

La moyenne de la cadence de marche chez les 15 participants le long du couloir était de 111 pas/min, cela diminuait sur le tapis à vitesse fixe à 106 pas/min. Par contre, la cadence était chiffrée à 110 pas/min en mode haptique et se rapprochait donc le plus de la condition de marche le long du couloir par rapport à celle sur le tapis à vitesse fixe.

3.2.1.2 ANOVA de la moyenne de la cadence de marche et du CV dans trois conditions après correction des perturbations en mode haptique

Tableau 3.5 ANOVA de la moyenne de la cadence dans les trois conditions de marche après correction

Paramètres	Conditions		
	Couloir	Tapis vitesse fixe	Tapis mode haptique après correction des perturbations
Moyenne de la cadence (pas/min) des 15 participants	112 ± 7	111 ± 8	112 ± 9

Nous pouvons affirmer qu'il n'y a pas de différence significative de la moyenne des cadences des 15 participants dans les trois conditions de marche après correction des perturbations en mode haptique.

3.2.1.3 Mesure du CV de la cadence de marche

Voir Tableau-A I-8 illustrant le coefficient de variation de la cadence de marche chez les 15 participants dans les trois conditions de marche.

La figure suivante représente l'évolution de la variabilité de la cadence dans les trois conditions de marche

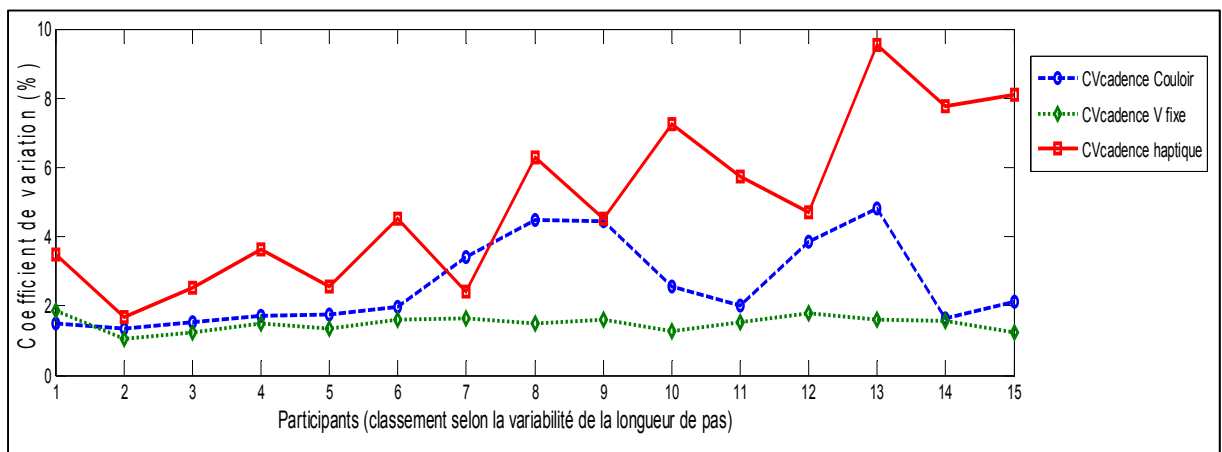


Figure 3.11 Évolution du CV de la cadence dans trois conditions de marche

Nous pouvons d'ailleurs remarquer que le CV en condition haptique se situe entre (2,4% et 3,62%) pour les sept premiers participants se rapprochant ainsi le plus de la condition couloir (1,51% à 3,43%) que celle sur le tapis roulant à vitesse fixe (1,04% à 1,66%).

3.2.1.4 ANOVA du coefficient de variation de la cadence de marche après correction des perturbations en mode haptique

Tableau 3.6 ANOVA du CV de la cadence de marche

Paramètres	Conditions		
	Couloir	Tapis vitesse fixe	Tapis mode haptique après correction des perturbations
Moyenne des CV de la cadence (%) des 15 participants	2,61 ± 1,24	1,49 ± 0,22	3,19 ± 1,03 ^π

(Pi) indique une différence hautement significative entre la condition du tapis à vitesse fixe vs le mode haptique ($p < 0.001$). Il n'y a pas de différence significative du CV de la cadence par rapport aux conditions (couloir vs tapis fixe) et celle de la condition (couloir vs tapis haptique) qui est considérée comme fortement non significative. Contrairement à cela, la condition (tapis à vitesse fixe vs mode haptique), il existe donc une différence hautement significative du CV de la cadence de marche.

3.2.1.5 Correction des perturbations en mode haptique des huit participants les plus variables concernant la cadence

Le tableau-A I-9, exprime le CV de la cadence dans les trois conditions de marche avec correction des perturbations en mode haptique concernant les huit participants les plus variables.

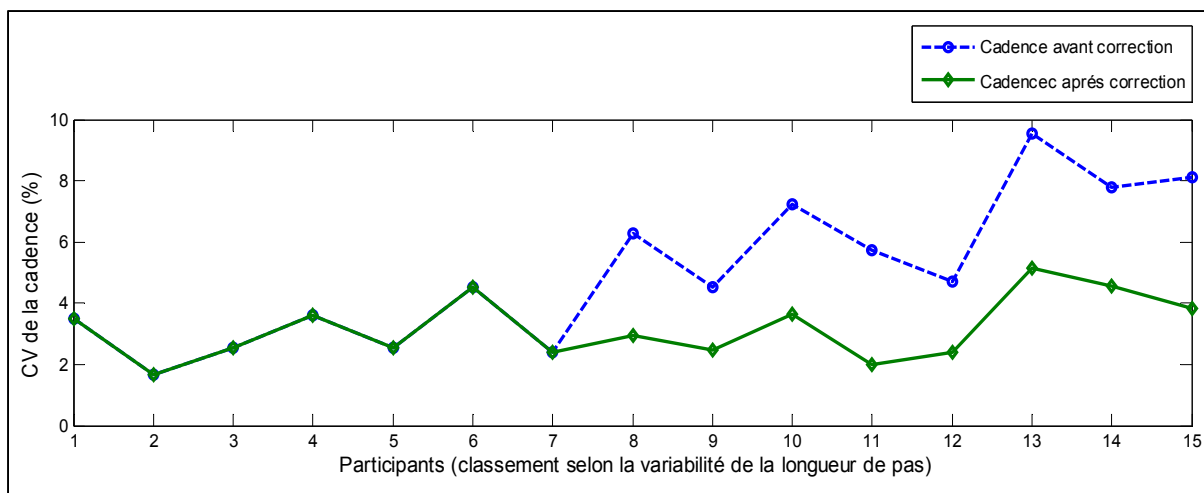


Figure 3.12 CV de la Cadence avant et après correction des perturbations en mode haptique chez les huit participants les plus variables

Nous avons remarqué que le CV de la cadence avait chuté pratiquement de 50 % après la correction des perturbations en mode haptique pour les huit participants les plus variables.

La figure suivante exprime l'évolution de la cadence en mode haptique avant et après correction des perturbations, concernant le participant 1 (à titre d'exemple).

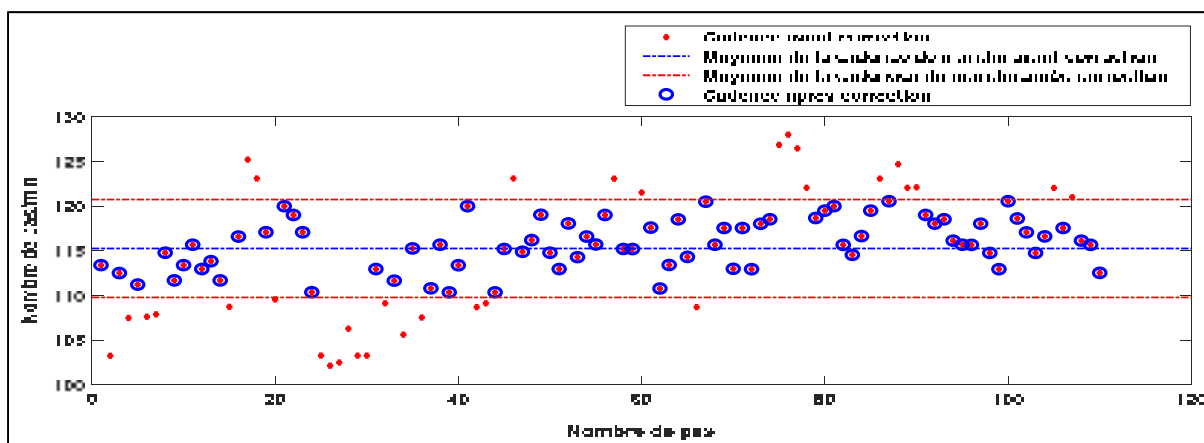


Figure 3.13 Cadence avant et après correction des perturbations en mode haptique chez le participant 1

Sur la figure ci-dessus, une diminution de la variabilité de la cadence a été constatée après correction des perturbations ; d'ailleurs le CV passe de 4,72% à 2,39% (une diminution d'environ 50%).

3.2.2 Mesure de la vitesse de marche par le système de capteurs inertiels (Xsens) dans les trois conditions de marche

3.2.2.1 Mesure de la moyenne de la vitesse de marche dans les trois conditions de marche

Voir Tableau-A I-10 illustrant la moyenne de la vitesse de marche des 15 participants dans les trois conditions de marche.

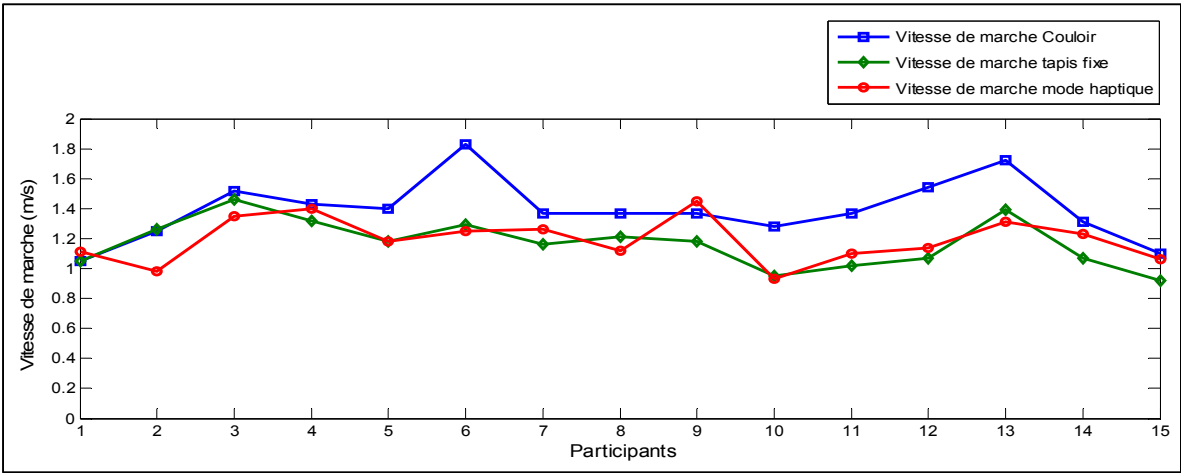


Figure 3.14 Moyenne de la vitesse de marche des 15 participants dans les trois conditions de marche

La vitesse de marche tend à diminuer sur le tapis à vitesse fixe (1,17 m/s) et en mode haptique (1,13 m/s) comparativement à celle mesurée le long du couloir (1,39 m/s).

3.2.2.2 ANOVA de la moyenne de la vitesse de marche

Tableau 3.7 ANOVA de la vitesse de marche dans les trois conditions de marche

Paramètres	Conditions		
	Couloir	Tapis vitesse fixe	Tapis mode haptique après correction des perturbations
Moyenne de la vitesse (m/s) de marche des 15 participants	1,39 ± 0,20	1,17 ± 0,16	1,21 ± 0,15

Il n'y a pas de différence significative entre les moyennes de la vitesse de marche de la condition couloir vs mode haptique et celle de la condition haptique vs la vitesse fixe.

Cependant nous remarquons qu'il n'y a pas de différence hautement significative entre la condition couloir vs tapis fixe.

3.2.2.3 Mesure du Coefficient de variation de la vitesse de marche

Voir Tableau-A I-11 illustrant le CV de la vitesse de marche des 15 participants dans les trois conditions de marche.

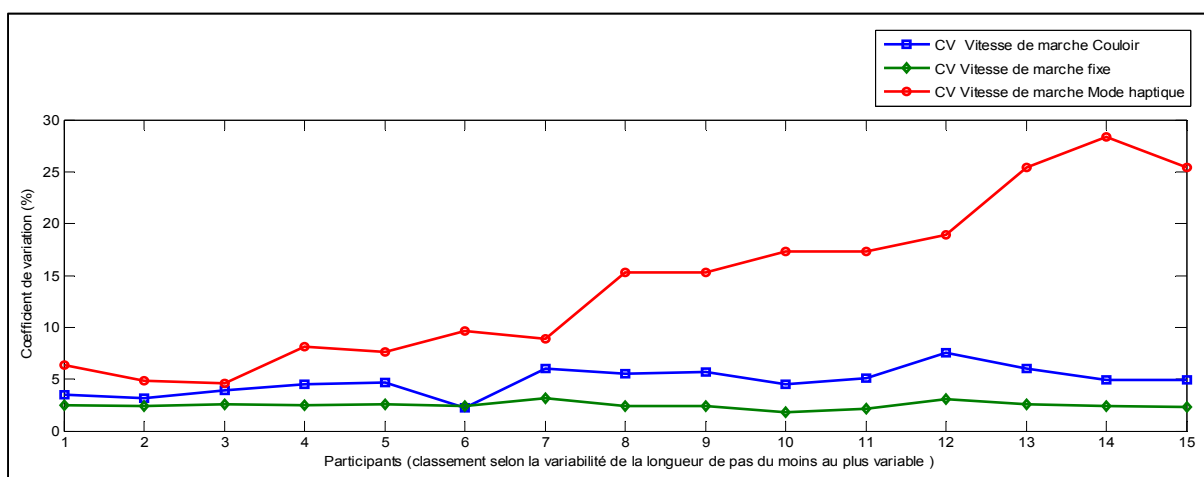


Figure 3.15 CV de la vitesse dans les trois conditions de marche considérée du moins au plus variable en mode haptique

La figure ci-dessus illustre le CV de la vitesse de marche dans les trois conditions de marche nous permettant de constater un CV dans la condition haptique se situant entre (6,33 et 8,92 %) pour les sept participants les moins variables, se rapprochant le plus de la condition couloir (2,21% et 6,04%) que celui en condition vitesse fixe (2,4% et 3,2%).

3.2.2.4 ANOVA du coefficient de variation de la vitesse de marche

Tableau 3.8 ANOVA du CV de la vitesse de marche

Paramètres	Conditions		
	Couloir	Tapis vitesse fixe	Tapis mode haptique après correction des perturbations
Moyenne des CV de la vitesse de marche (%) des 15 participants	4,81 ± 1,27	2,49 ± 0,31*	9,02 ± 3,73 * ^π

(*) indique une différence hautement significative entre la condition (tapis à vitesse fixe vs couloir) et la condition (tapis vitesse à fixe vs haptique) ($p < 0.001$).

(Pi) indique une différence significative entre la condition du couloir vs le mode haptique ($p < 0.01$).

Il réside une différence hautement significative entre la condition couloir vs tapis à vitesse fixe et la condition tapis à vitesse fixe vs haptique des CV de la vitesse de marche. Cependant il existe une différence significative entre la condition couloir vs haptique.

3.2.2.5 Correction des perturbations en mode haptique des huit participants les plus variables concernant la vitesse de marche

La figure suivante exprime l'évolution du CV de la vitesse en mode haptique avant et après correction des perturbations, concernant les 8 participants les plus variables.

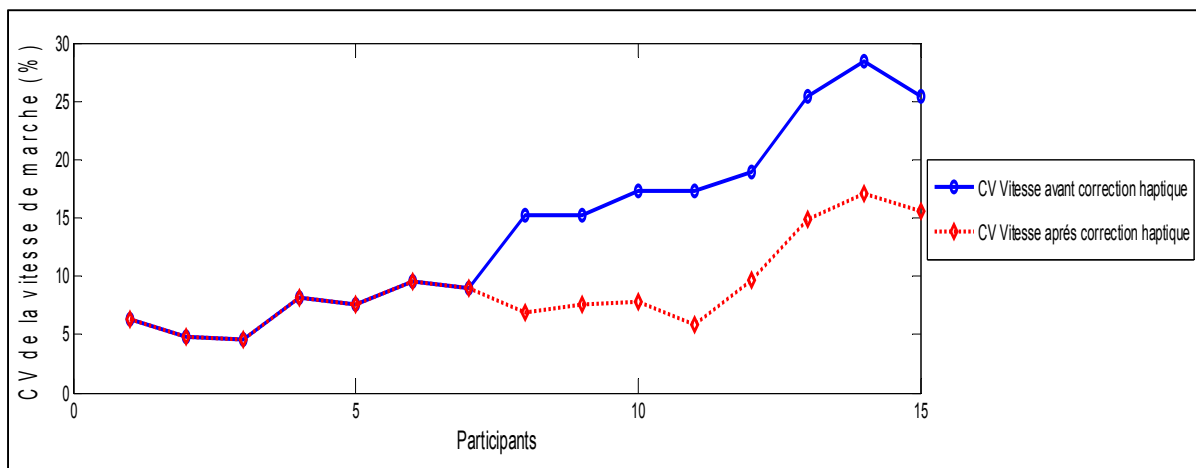


Figure 3.16 CV de la vitesse de marche avant et après correction des perturbations en mode haptique concernant les 8 participants les plus variables

Nous avons remarqué que le CV de la vitesse de marche avait chuté pratiquement de 50 % après la correction des perturbations en mode haptique pour les huit participants les plus variables.

Voir le Tableau-A I-12 illustrant le CV de la vitesse de marche en mode haptique avant et après correction des perturbations, concernant le participant 1.

La figure suivante exprime l'évolution de la vitesse de marche en mode haptique avant et après correction des perturbations, concernant le participant 01 (à titre d'exemple).

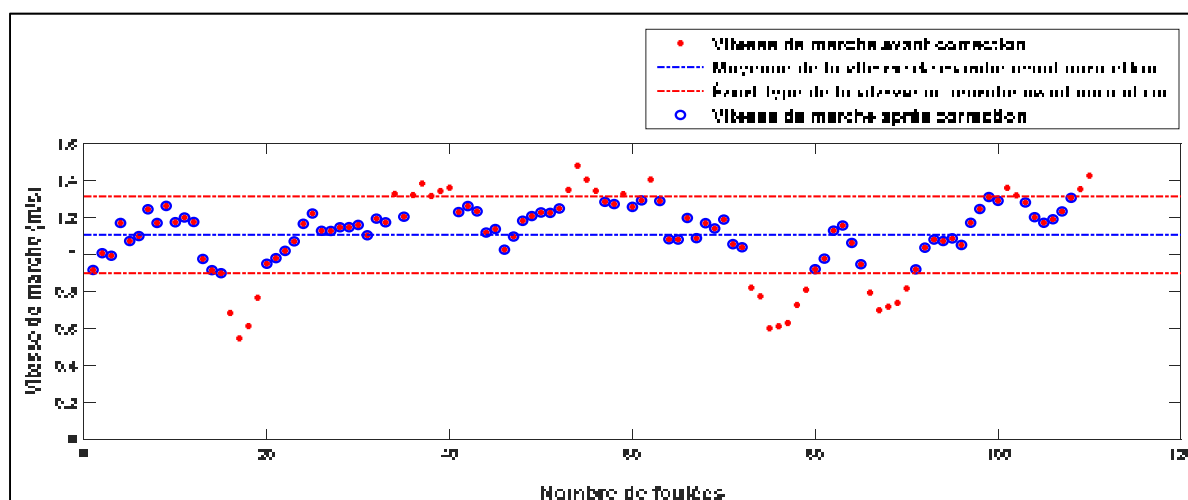


Figure 3.17 Vitesse de marche avant et après correction des perturbations en mode haptique chez le participant 1

Nous pouvons constater sur la figure ci-dessus qu'il y a moins de variabilité de la cadence après correction des perturbations ; d'ailleurs le CV passe de 18,96 % à 9,65 % (une diminution de 50% environ).

3.3 Résultat du questionnaire qualitatif sur la marche dans les trois conditions de marche

Afin d'évaluer l'expérience vécue de chaque participant lors des acquisitions dans les trois conditions de marche ; une série de treize questions soumises à ces derniers nous a semblé pertinente afin de recueillir les impressions de chacun et de pouvoir établir si le mode haptique fonctionne correctement lors de la marche sur le tapis, si l'utilisateur est en contrôle de ce dernier et est en sécurité.

Les questions posées sont présentées dans l'annexe IV et ont été évaluées à l'aide d'une échelle numérique allant de 1 à 10 : (1) étant en désaccord total et (10) étant totalement d'accord.

Le tableau suivant illustre les scores ainsi que les médianes obtenues pour chaque question posée aux participants :

Tableau 3.9 Scores ainsi que les médianes obtenues pour chaque question posée aux participants

Participants	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13
Pa 01	3	9	3	2	9	3	3	8	2	9	10	1	0
Pa 02	10	10	10	10	10	8	10	1	1	1	10	1	0
Pa 03	1	10	4	1	1	2	4	2	1	9	10	1	0
Pa 04	4	8	6	1	3	7	4	7	3	1	10	3	4
Pa 05	1	5	6	1	1	7	6	1	1	4	10	1	0
Pa 06	1	10	2	1	1	3	10	1	1	10	10	1	0
Pa 07	1	8	5	1	4	4	9	6	2	6	10	1	0
Pa 08	3	9	8	1	8	8	9	1	1	5	10	2	1
Pa 09	1	10	8	1	1	9	8	5	1	1	10	1	0
Pa 10	3	9	7	1	1	7	8	3	1	1	10	1	0
Pa 11	2	8	4	2	2	4	7	10	2	7	10	2	2
Pa 12	4	9	4	6	8	8	5	10	3	9	10	1	0
Pa 13	1	10	8	1	1	8	7	9	1	3	10	1	0
Pa 14	1	10	8	1	3	8	9	10	1	3	10	1	0
Pa 15	3	9	7	1	1	5	10	1	2	3	1	10	1
Médiane	2	9	6	1	2	7	8	5	1	4	10	1	0

3.4 Calcul de la moyenne quadratique moyenne (RMS) de la longueur de pas droite et gauche mesurée par le Vicon et le système inertiel X sens sur tapis roulant en mode vitesse fixe et haptique

« La valeur efficace, dite aussi valeur RMS (Root Mean Square, moyenne quadratique) d'un signal périodique ou d'un signal aléatoire ergodique, est la racine carrée de la moyenne de cette grandeur au carré, sur un intervalle de temps donné ou la racine carrée du moment d'ordre deux (ou variance) du signal » tiré de : https://fr.wikipedia.org/wiki/Valeur_efficace.

Dans notre étude, nous avons calculé cette valeur RMS, afin d'estimer la différence de calcul entre deux systèmes de capture du mouvement distinct : le système de capture inertiel (X sens) par rapport à celle mesurée par le système optoélectronique (Vicon) qui est considéré comme l'outil de mesure de référence (Gold standard) et ce dans la mesure des paramètres

biomécaniques de la marche (dans notre étude il s'agissait des paramètres spatio-temporels de la marche).

Nous avons donc choisi de calculer le RMS de la longueur de pas droit et gauche et avons établi la concordance des chiffres obtenus, entre le système Xsens et Vicon sur le tapis à vitesse fixe et en mode haptique en comparant le côté droit et le côté gauche dans chaque condition de marche.

Nous avons pu constater que la plus petite différence de mesure du RMS de la longueur de pas droit était de 0,01 m soit 1 cm du côté droit et de 0,005 m soit 0,5 cm du côté gauche sur le tapis à vitesse fixe. Elle était de 0,011 m soit 1,1 cm du côté droit et 0,016 m soit 1,6 cm du côté gauche sur le tapis toujours, mais cette fois-ci en mode haptique, concernant le participant 15, considéré comme étant dans le groupe le moins variable qui n'a pas été concerné par la méthode de correction des perturbations en mode haptique.

Nous pouvons aussi constater que la plus grande différence de mesure du RMS de la longueur de pas droit était de 0,057 m soit 5,7 cm du côté droit et de 0,082 m soit 8,2 cm du côté gauche sur le tapis à vitesse fixe, concernant le participant 3.

Elle était de 0,11 m soit 11 cm du côté droit et 0,10 m soit 10 cm du côté gauche sur le tapis toujours, mais cette fois-ci en mode haptique, concernant toujours le participant 3 considéré comme étant le plus variable du groupe.

Le tableau ci-dessous illustre le calcul du RMS de la longueur de pas droit et gauche de 15 participants estimés par le système Vicon et du X sens dans deux conditions de marche sur le tapis roulant.

Tableau 3.10 Concordance de mesure (VICON vs Xsens) de la longueur de pas droite et gauche

	Concordance Vicon Xsens	Concordance Vicon Xsens	Concordance Vicon Xsens	Concordance Vicon Xsens
RMS	RMS (Vitesse Fixe) Côté droit	RMS (Vitesse Fixe) Côté gauche	RMS (Mode Haptique) Côté droit	RMS (Mode Haptique) Côté gauche
Participants	Longueur de pas (m)	Longueur de pas (m)	Longueur de pas (m)	Longueur de pas (m)
Pa01	0,030	0,056	0,034	0,040
Pa02	0,052	0,039	0,074	0,047
Pa03	0,057	0,082	0,110	0,100
Pa04	0,023	0,022	0,028	0,017
Pa05	0,045	0,037	0,055	0,046
Pa06	0,013	0,022	0,086	0,069
Pa07	0,045	0,032	0,058	0,025
Pa08	0,044	0,035	0,030	0,021
Pa09	0,050	0,035	0,030	0,025
Pa10	0,008	0,015	0,059	0,052
Pa11	0,026	0,030	0,024	0,022
Pa12	0,025	0,037	0,014	0,035
Pa13	0,037	0,039	0,109	0,121
Pa14	0,030	0,020	0,046	0,032
Pa15	0,010	0,005	0,011	0,016

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Pour rappel, l'objectif principal de notre travail de recherche visant à évaluer la capacité du tapis roulant implémenté par un modèle haptique, à générer une marche dite « naturelle ». Pour cela, il s'agissait de : caractériser la marche « naturelle » sur le sol ; comparer les caractéristiques de la marche « naturelle » aux caractéristiques observées à la marche : sur un tapis roulant à vitesse fixe et sur un tapis roulant en mode « haptique » à vitesse variable.

Pour ce faire, une expérimentation a été menée avec 15 participants volontaires sains au cours de laquelle nous avons évalué quatre paramètres spatio-temporels (la longueur de pas droit et gauche, la foulée, la cadence et enfin la vitesse de marche) et leurs variabilités dans trois conditions expérimentales: la marche naturelle le long d'un couloir de marche (situation de référence), la marche sur le tapis roulant à deux voies à vitesse fixe et enfin et la marche sur un tapis roulant en mode de contrôle haptique.

4.1 Analyse des paramètres spatio-temporels de la marche

En effet, une moyenne, un écart-type de tous les cycles de marche ainsi qu'un CV ont été calculés pour chaque paramètre spatio-temporel. Les données recueillies ont été confrontées entre elles dans les trois conditions de marche dans un premier temps, puis à la littérature dans un second temps afin d'affirmer ou d'infirmer notre hypothèse de recherche.

Nous avons pu constater que les moyennes des longueurs de pas droits et gauches chez les deux groupes (femmes et hommes) le long du couloir demeuraient plus élevées ($L_P D 0,74 \pm 0,06$ m, $L_P G 0,72 \pm 0,07$ m) que celles enregistrées sur le tapis à vitesse fixe ($L_P D 0,64 \pm 0,08$ m, $L_P G 0,62 \pm 0,07$ m) et en mode haptique ($L_P D 0,64 \pm 0,07$ m, $L_P G 0,63 \pm 0,07$ m), tous sexes confondus, cela rejoint l'étude de Murray et al, (1985) où l'on retrouvait une longueur de pas à $0,70 \pm 0,01$ m le long du couloir contre une longueur de pas à $0,68 \pm 0,02$ m sur le tapis à vitesse fixe.

Nous avons pu aussi constater que la moyenne des longueurs de foulées chez les femmes et les hommes, le long du couloir, demeuraient plus élevés respectivement (1,47 m et 1,46 m) comparativement à celle enregistrée sur le tapis à vitesse fixe respectivement (1,24 m et 1,28 m) et en mode haptique respectivement (1,27 m et 1,29 m), quel que soit le sexe.

Par conséquent la longueur de foulée diminuait lors de la marche sur le tapis à vitesse fixe et en mode haptique par rapport à celle mesurée le long du couloir, cela avait rejoint aussi l'étude de Murray et al., (1985) et celle de Stolze et al., (1997) ou l'on retrouvait une longueur de foulée à 1,63 m en moyenne par rapport à celle mesurée sur le tapis à vitesse fixe qui était de 1,56 m. Le même raisonnement est valable pour l'auteur Dingwell et al., (2001) ou la longueur de foulée diminuait sur le tapis à vitesse fixe par rapport à la marche le long du couloir (à titre d'exemple la longueur de foulée sur tapis était de 1,70 m contre 1,50 m le long du couloir pour l'un des participants), Dingwell et al., (2001) avaient conclu que la marche sur le tapis roulant à vitesse fixe affectait la variabilité naturelle en la réduisant, déformant ainsi le patron de marche.

La moyenne de la cadence de marche chez les femmes le long du couloir était de 113 pas/min, cela tendait à augmenter sur le tapis à vitesse fixe à 115 pas/min et à 116 pas/min en mode haptique, cela avait rejoint l'étude de Alton et al., (1998) où la cadence le long du couloir était de 117 pas/min et 122 pas/min sur le tapis à vitesse fixe.

Parallèlement la moyenne de la cadence de marche chez les hommes le long du couloir était de l'ordre de 109 pas/min, cela tendait à diminuer à 108 pas/min sur le tapis à vitesse fixe et à 105 pas/min en mode haptique, cela venait en totale contradiction avec l'étude réalisée par Alton et al., (1998) ou la cadence sur le tapis augmentait par rapport à celle enregistrée le long du couloir.

En définitive, les femmes avaient tendance à avoir une cadence plus élevée sur le tapis par rapport à celle mesurée le long du couloir, et ce contrairement à celle des hommes. La vitesse de marche tendait à diminuer sur le tapis à vitesse fixe et en mode haptique comparativement à celle mesurée le long du couloir, quel que soit le sexe. Elle était de 1,39 m/s le long du couloir et 1,17 m/s sur le tapis à vitesse fixe et à 1,21 m/s en mode haptique tous sexes confondus. Cela avait rejoint l'étude de Murray et al., (1985) ou la vitesse de marche enregistrée le long du couloir était de 1,42 m/s et de 1,38 m/s sur le tapis à vitesse fixe.

S'agissant de l'évaluation du CV de la longueur de pas droit et gauche en mode haptique, il a été remarqué qu'elle se rapprochait de celle de la condition de marche le long du couloir se situant ainsi entre 3 et 10% et ce par rapport aux sept premiers participants, qui étaient considérés comme les moins variables par rapport au reste du groupe (voir tableau-A I-3). Cela rejoignait l'étude de Oberg et al., (1993), où le CV calculé se situait entre (5 et 11%) en condition de marche le long d'un couloir. Par ailleurs, tous les participants présentaient un CV sur le tapis à vitesse fixe qui était moindre que celui du couloir et du tapis en mode haptique se situant ainsi entre 2 et 5% (voir tableau-A I-3).

Il a été noté aussi que le CV de la vitesse de marche en condition haptique se situait entre (6,33 et 8,92 %) pour les sept premiers participants, considérés comme les moins variables des 15 participants, se rapprochant ainsi le plus de la condition couloir se situant entre 2 et 6% comparativement à celle en condition vitesse fixe se situant entre (2 et 3%). Ceci rejoint l'étude de Hirokawa., (1989) où le coefficient de variation de la marche le long du couloir se situait entre (2 et 5%). Nous avons pu d'ailleurs remarquer que le CV en condition haptique se situait entre (2,4 et 3,62 %) pour les sept premiers participants se rapprochant ainsi le plus de la condition couloir (1,51 à 3,43%) que celle sur le tapis roulant à vitesse fixe (1,04 à 1,66%).

Une correction des perturbations des données en condition haptique des quatre paramètres spatio-temporels a été réalisée sur les huit derniers participants qui étaient considérés comme les plus variables du groupe des 15 participants. Nous avons pu constater que le CV a chuté de 30 à 60 % en moyenne de sa valeur initiale, concernant la longueur de pas, la longueur de foulée, la cadence ainsi que la vitesse de marche.

4.2 Analyse statistique des paramètres spatio-temporels de la marche en ayant recours à l'analyse de variance (ANOVA)

Un autre volet de l'analyse des paramètres spatio-temporels a concerné les analyses de variances (ANOVA) après correction des données en mode haptique des quatre paramètres spatio-temporels.

S'agissant de la moyenne de la longueur de pas droite et gauche chez les 15 participants, nous avons pu retenir qu'il y avait une différence significative entre les moyennes des longueurs de pas dans la condition tapis fixe vs couloir et tapis en mode haptique vs couloir.

Cela rejoint l'étude de Yang et al. (2016) où il y avait une différence fortement significative entre la moyenne de la longueur de pas entre la condition du couloir et celle du tapis à vitesse fixe avec ($p < 0,01$).

Concernant le CV de la longueur de pas droit et gauche en mode haptique, ce dernier se rapprochait de celui de la condition de marche le long du couloir, et ce par rapport aux sept premiers participants, qui étaient considérés comme les moins variables, par rapport au reste du groupe. Par ailleurs tous les participants marchant sur le tapis à vitesse fixe avaient présenté une variabilité moindre que celle mesurée le long du couloir et sur le tapis en mode haptique. Nous avons pu affirmer en conclusion qu'il n'y avait pas de différence significative entre la marche le long du couloir et celle sur le tapis en mode haptique après correction des perturbations. En parallèle, Il existait une différence significative entre couloir vs tapis fixe et tapis fixe vs mode haptique après corrections des perturbations en mode haptique.

En ce qui concerne la moyenne des longueurs de foulées chez les 15 participants, cette dernière avait diminué lors de la marche sur le tapis à vitesse fixe et en mode haptique par rapport à celle mesurée le long du couloir. L'ANOVA avait révélé une différence significative de la moyenne de la longueur de foulée dans la condition couloir vs tapis fixe et couloir vs mode haptique et pas de différence significative s'agissant de la condition tapis fixe vs mode haptique, le même résultat a été constaté dans l'étude de Stolze et al., (1997) concernant la comparaison de la moyenne de la longueur de foulée dans la condition (couloir vs tapis fixe) avec un ($p < 0,01$). Cependant l'étude de Lee et al. (2006) ont révélé qu'il n'y avait pas de différence significative de la moyenne des longueurs de foulée dans la condition couloir vs tapis fixe $p = 0,86$. Dingwell et al. (2001) adhèrent aussi à cet avis ($p = 0,065$).

Le CV de la longueur de foulée en mode haptique se rapprochait de celui de la condition de marche le long du couloir et ce par rapport aux sept premiers participants, qui étaient considérés comme les moins variables par rapport au reste des participants. Dans l'étude de Sloot et al., (2013), les participants étaient soumis à une marche sur tapis à vitesse fixe et une autre en mode self paced (vitesse de bande du tapis auto contrôlée) qui se rapprochait le plus de notre condition de marche en mode haptique. Il a été constaté que la variabilité de la foulée en mode self paced avait augmenté de 39% par rapport à celle mesurée sur le tapis à vitesse fixe. Nous avons retrouvé dans notre étude une augmentation de cette variabilité d'environ trois fois plus par rapport à celle mesurée sur le tapis à vitesse fixe.

En ce qui concerne la moyenne de la cadence de marche sur le tapis en mode haptique, cette dernière était presque identique à celle mesurée le long du couloir et était un peu moins importante sur le tapis à vitesse fixe. Le CV de la cadence en mode haptique se rapprochait de celui de la condition du couloir pour les sept participants considérés les moins variables. Cela est en totale contradiction avec l'étude de Stolze et al., (1997) où la moyenne de la cadence était significativement différente ($p < 0,05$) lors de la comparaison de la condition du couloir à celle du tapis à vitesse fixe et était en totale adéquation avec l'étude de Lee et al., (2006) où la moyenne de la cadence était non significativement différente ($p = 0,28$) lors de la comparaison de la condition du couloir à celle du tapis à vitesse fixe. Hollman et al., (2015) partagent aussi cet avis, mais soulignent toutefois le fait qu'il résidait une différence notable de la variabilité de la cadence évoquant ainsi une moindre variabilité sur le tapis à vitesse fixe comparativement à la condition du couloir qui est en totale adéquation avec nos résultats.

Finalement, la vitesse de marche tendait à diminuer sur le tapis en mode haptique et à vitesse fixe comparativement à celle mesurée le long du couloir. L'ANOVA a révélé qu'il n'y avait pas de différence significative entre la condition couloir et celle du tapis fixe. Cela rejoint d'ailleurs l'étude de Lee et al., (2006) où la moyenne de la vitesse de marche était non significativement différente lors de la comparaison de la condition du couloir à celle du tapis à vitesse fixe avec un ($p = 0,95$). L'étude de Yang et al., (2016) a révélé que les personnes avaient tendance à diminuer leur vitesse de marche sur le tapis à vitesse fixe comparativement à celle le long du couloir ($p < 0,001$), il y avait donc une différence significative.

Ici aussi, le CV de la vitesse de marche en mode haptique des sept participants considérés les moins variables se rapprochait le plus de la condition du couloir que celle du tapis à vitesse fixe, cela rejoignait l'étude de Harris et al., (2001) où le CV des paramètres temporels tel que la durée de cycle diminuait de 40% (moins de variabilité) sur le tapis roulant à vitesse fixe comparativement à la condition couloir, en d'autres termes le tapis à vitesse fixe réduisait l'asymétrie de certains paramètres temporels comme la durée de cycle et donc déformait le patron de marche original. Sloot et al., (2013) avaient décrit dans leurs études qu'il y avait une augmentation de la variabilité de la vitesse de marche en mode auto contrôlée de 54% par rapport à la condition de marche sur le tapis à vitesse fixe. De notre côté nous avons retrouvé aussi une augmentation de la variabilité de la vitesse de marche en mode haptique par rapport à la condition de marche à vitesse fixe.

Après avoir soumis les huit participants ayant présentés les CV des longueurs de pas droits et gauches, la longueur de foulée, la cadence ainsi que la vitesse de marche les plus variables du groupe, à notre méthode de corrections de perturbations en mode haptique, il a été retenu une diminution de près de 50% du CV.

4.3 Interprétation des résultats du questionnaire qualitatif dans les trois conditions de marche

À travers les scores des participants, il a été retenu :

- Concernant la question 1 : La plupart des participants ne ressentaient pas un inconfort lors du port du harnais de sécurité durant la marche.
- Concernant la question 2 : La plupart des participants n'éprouvaient pas de sensations d'inconfort lors de la marche sur le tapis à vitesse fixe.
- Concernant la question 3 : 8 participants sur 15 éprouvaient le plus, un inconfort lors de la marche sur le tapis en mode haptique.
- Concernant la question 4 : 14 participants sur 15 n'éprouvaient pas un sentiment d'insécurité sur le tapis à vitesse fixe sauf le participant 2.
- Concernant la question 5 : 4 participants sur 15 avaient éprouvé un sentiment d'insécurité sur le tapis en mode haptique.
- Concernant la question 6 : Les participants avaient rapporté avoir un certain contrôle sur le tapis roulant en mode haptique.
- Concernant la question 7 : La grande majorité des participants avaient rapporté que la vitesse de marche sur le tapis à vitesse fixe semblait naturelle comparativement à celle le long du corridor.
- Concernant la question 8 : 4 participants sur 15 avaient rapporté que leur vitesse sur le tapis roulant à vitesse fixe leur semblait plus rapide que celle perçue en marchant le long du corridor.
- Concernant la question 9 : La majorité des participants avaient rapporté qu'ils n'avaient pas éprouvé de difficulté vis-à-vis de la période d'adaptation sur le tapis à vitesse fixe.
- Concernant la question 10 : 4 participants sur 15 avaient affirmé avoir eu de la difficulté à s'adapter à marcher sur le tapis en mode haptique avec un score de 4,8/10 en moyenne.
- Concernant la question 11 : 14 participants sur 15 avaient ressenti la transition de la vitesse du tapis à vitesse fixe vers le mode haptique sauf le participant 15.

- Concernant la question 12 : La majorité des participants n'avaient pas été perturbés par le bruit des courroies lors de la marche sur le tapis roulant.

4.4 Limites de notre étude

Le modèle haptique actuel implémenté sur le tapis roulant présente certaines défaillances, nécessitant des ajustements de l'algorithme pour des résultats plus homogènes. Nous avons pu décrire dans la partie méthodologie que les résultats obtenus pour les huit participants considérés comme les plus perturbés ont été soumis à un traitement par un code généré sur Matlab permettant de filtrer les données aberrantes n'étant pas considérées comme des patrons de marche de référence (norme).

Nous avons aussi essayé de comprendre par la même occasion pourquoi le modèle est plus stable pour certains participants par rapport au reste du groupe.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail de recherche était d'analyser la marche naturelle dans trois conditions différentes afin d'apprécier en définitive si la marche sur tapis roulant en mode haptique se rapprochait le plus ou divergeait de la marche naturelle sur corridor par rapport à celle sur le tapis roulant à vitesse fixe. Telle est l'hypothèse de recherche de cette maîtrise.

Ce travail a permis de confronter trois situations de marche. La première le long d'un corridor, la seconde sur un tapis roulant à vitesse fixe et la troisième le long du tapis roulant en mode haptique et analyser par la même occasion quatre paramètres spatio-temporels et à confronter nos données à celles de la littérature.

Le CV de la longueur de pas droit et gauche, de la foulée, de la cadence ainsi que celui de la vitesse de foulée a été calculé afin d'estimer la variabilité de la marche dans trois conditions de marche différentes. Un tel travail de recherche n'a à ma connaissance pas encore été réalisé à ce jour, il permettra sûrement d'avoir une idée plus précise du comportement de la personne lorsqu'elle est confrontée à différents environnements de marche.

Nous avons d'ailleurs pu constater de par les résultats recueillis que le CV de la longueur de pas droit et gauche était plus élevé chez certains participants lors de la marche sur le tapis en mode haptique comparativement à celui le long du couloir et dépassait de loin celui mesuré sur le tapis roulant à vitesse fixe.

Une analyse de variance (ANOVA) a été calculée sur les moyennes ainsi que les coefficients de variation des quatre paramètres spatio-temporels cités ci-dessus. S'agissant de l'ANOVA du CV de la longueur de pas droit et gauche ainsi que celle de la cadence, il n'y avait pas de différence significative entre la marche le long du couloir et celle sur le tapis en mode haptique après la correction des perturbations ce qui nous a permis d'affirmer que la marche sur le tapis roulant en mode haptique se rapprochait le plus de celle de la marche le long du couloir que celle sur le tapis roulant à vitesse fixe.

RECOMMANDATIONS

Au vu d'une suite à mon travail de recherche, afin d'en favoriser les retombées, nous proposons une série de recommandations qui pourraient servir au devenir de ce projet.

Il serait important de renforcer la robustesse de l'algorithme du modèle haptique afin de mieux étudier la marche humaine et sa pathologie au vu d'une réadaptation fonctionnelle des personnes victimes d'un accident vasculaire cérébral avec hémiparésie.

Faciliter l'utilisation de l'environnement du tapis et de ses outils de capture en améliorant la plateforme usager, et ce dans un but d'être plus simple à manipuler surtout pour des personnes qui maîtriseraient moins le domaine technique.

Prévoir une formation spécialisée au vu de l'utilisation du tapis et de son environnement de capture du mouvement en éditant un manuel d'utilisation simple.

ANNEXE I

**TABLEAUX ILLUSTRANTS LES MOYENNES, LES ÉCART-TYPES ET LES CV DES
VARAIABLES SPATIO-TEMPORELLES AVANT ET APRÈS CORRECTION DES
PÉRTURBATIONS EN MODE HAPTIQUE**

Tableau A I-1 Représentation de la moyenne ainsi que de l'écart-type de la longueur de pas des 15 participants estimés dans les trois conditions de marche

	Couloir		Tapis Vitesse fixe		Tapis Mode haptique	
	Moyenne	Écart- type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
L Pas D (m)	0,65	0,03	0,59	0,03	0,57	0,12
L Pas G (m)	0,58	0,03	0,58	0,02	0,59	0,12
P 02						
L Pas D (m)	0,67	0,03	0,62	0,02	0,52	0,07
L Pas G (m)	0,67	0,03	0,59	0,02	0,51	0,06
P 03						
L Pas D (m)	0,80	0,05	0,75	0,02	0,64	0,16
L Pas G (m)	0,81	0,03	0,73	0,02	0,66	0,14
P 04						
L Pas D (m)	0,82	0,02	0,76	0,02	0,78	0,05
L Pas G (m)	0,79	0,03	0,74	0,02	0,77	0,05
P 05						
L Pas D (m)	0,75	0,04	0,65	0,02	0,67	0,03
L Pas G (m)	0,72	0,02	0,64	0,02	0,66	0,03
P 06						
L Pas D (m)	0,84	0,02	0,63	0,02	0,59	0,14
L Pas G (m)	0,80	0,05	0,56	0,02	0,58	0,12
P 07						
L Pas D (m)	0,72	0,04	0,65	0,02	0,67	0,15
L Pas G (m)	0,71	0,04	0,6	0,02	0,68	0,12
P 08						
L Pas D (m)	0,70	0,03	0,68	0,02	0,65	0,07
L Pas G (m)	0,74	0,03	0,65	0,02	0,63	0,07
P 09						
L Pas D (m)	0,71	0,02	0,64	0,015	0,68	0,03
L Pas G (m)	0,68	0,02	0,57	0,015	0,69	0,03
P 10						
L Pas D (m)	0,72	0,04	0,58	0,016	0,59	0,07
L Pas G (m)	0,70	0,04	0,56	0,016	0,57	0,07
P 11						
L Pas D (m)	0,76	0,04	0,62	0,01	0,68	0,03
L Pas G (m)	0,75	0,03	0,59	0,015	0,63	0,03
P 12						
L Pas D (m)	0,76	0,03	0,59	0,02	0,62	0,03
L Pas G (m)	0,77	0,04	0,59	0,01	0,63	0,03
P 13						
L Pas D (m)	0,81	0,08	0,77	0,02	0,73	0,11
L Pas G (m)	0,83	0,08	0,77	0,02	0,73	0,11
P 14						
L Pas D (m)	0,70	0,04	0,60	0,02	0,66	0,04
L Pas G (m)	0,68	0,07	0,60	0,02	0,66	0,04
P 15						
L Pas D (m)	0,63	0,03	0,49	0,02	0,55	0,05
L Pas G (m)	0,59	0,02	0,51	0,02	0,56	0,04

Tableau A I-2 Représentation du coefficient de variation (CV) de la longueur de pas droit et gauche dans les 3 conditions de marche du moins au plus variable en se basant sur variabilité de la longueur de pas droit en mode haptique

Conditions	CV (%) Longueur de pas Droit			CV (%) Longueur de pas Gauche		
	CV Couloir	CV Vitesse Fixe	CV Mode Haptique	CV Couloir	CV Vitesse Fixe	CV Mode Haptique
Participant 11	4,73	2,32	4,35	3,41	2,63	4,95
Participant 09	2,97	2,33	4,41	3,21	2,7	4,15
Participant 05	5,1	2,98	5,04	2,82	3,09	4,03
Participant 12	3,49	3,25	5,32	4,59	2,4	5,45
Participant 14	3,76	3,42	6,02	3,22	3,21	6,15
Participant 04	5,97	2,39	6,27	9,63	2,2	6,38
Participant 15	5,27	3,51	8,57	3,78	3,16	7,77
Participant 08	4,76	3,76	10,43	4,63	2,68	11,81
Participant 10	5,07	2,73	12,12	5,23	2,91	12,53
Participant 02	5,09	2,47	13,42	4,97	2,6	12,16
Participant 13	10,18	2,13	13,94	9,39	2,39	15,71
Participant 01	5,08	4,33	21,82	5,16	2,99	20,04
Participant 07	5,55	3,28	22,28	5,07	3,27	17,6
Participant 06	2,26	3,54	24,46	6,05	4,56	21,03
Participant 03	5,65	2,12	25,46	3,67	2,22	21,22

Tableau A I-3 exprime le CV de la longueur de pas droit et gauche dans les trois conditions de marche avec correction des perturbations en mode haptique concernant les huit participants les plus variables

Conditions	CV Longueur de pas Avant correction						CV Après correction haptique	
	CV Longueur de pas Droite			CV Longueur de pas Gauche			L pas D	L pas G
	CV Couloir	CV V Fixe	CV Mode Hapt	CV Couloir	CV V Fixe	CV M Hapt	CV Mode Hapt	CV Mode Hapt
Participant 11	4,73	2,32	4,35	3,41	2,63	4,95	4,35	4,95
Participant 09	2,97	2,33	4,41	3,21	2,7	4,15	4,41	4,15
Participant 05	5,1	2,98	5,04	2,82	3,09	4,03	5,04	4,03
Participant 12	3,49	3,25	5,32	4,59	2,4	5,45	5,32	5,45
Participant 14	3,76	3,42	6,02	3,22	3,21	6,15	6,02	6,15
Participant 04	5,97	2,39	6,27	9,63	2,2	6,38	6,27	6,38
Participant 15	5,27	3,51	8,57	3,78	3,16	7,77	8,57	7,77
Participant 08	4,76	3,76	10,43	4,63	2,68	11,81	4,55	6,25
Participant 10	5,07	2,73	12,12	5,23	2,91	12,53	6,67	6,90
Participant 02	5,09	2,47	13,42	4,97	2,6	12,16	7,55	5,66
Participant 13	10,18	2,13	13,94	9,39	2,39	15,71	5,33	5,19
Participant 01	5,08	4,33	21,82	5,16	2,99	20,04	10,00	9,84
Participant 07	5,55	3,28	22,28	5,07	3,27	17,6	12,86	8,45
Participant 06	2,26	3,54	24,46	6,05	4,56	21,03	13,11	14,04
Participant 03	5,65	2,12	25,46	3,67	2,22	21,22	14,93	11,94

Tableau A I-4 Représentation de la moyenne ainsi que de l'écart-type de la longueur de foulée des 15 participants estimée dans trois conditions de marche

Participants	Couloir		Tapis Vitesse fixe		Tapis Mode haptique	
L foulée (m)	Moyenne	Écart- type	Moyenne	Écart- type	Moyenne	Écart- type
Pa 01	1,23	0,04	1,17	0,03	1,16	0,23
Pa 02	1,32	0,05	1,21	0,02	1,03	1,03
Pa 03	1,61	0,05	1,48	0,02	1,31	0,3
Pa 04	1,62	0,02	1,49	0,02	1,56	0,09
Pa 05	1,46	0,04	1,29	0,03	1,33	0,05
Pa 06	1,64	0,06	1,2	0,03	1,19	0,26
Pa 07	1,43	0,06	1,25	0,03	1,35	0,26
Pa 08	1,44	0,04	1,32	0,03	1,28	0,14
Pa 09	1,39	0,03	1,21	0,02	1,37	0,05
Pa 10	1,44	0,07	1,15	0,03	1,16	0,14
Pa 11	1,51	0,05	1,2	0,02	1,31	0,05
Pa 12	1,53	0,05	1,17	0,02	1,25	0,06
Pa 13	1,75	0,07	1,53	0,02	1,46	0,2
Pa 14	1,38	0,05	1,2	0,03	1,32	0,07
Pa 15	1,21	0,04	1,00	0,02	1,11	0,08

Tableau A I-5 Représentation du CV de la longueur de foulée dans les trois conditions de marche du moins au plus variable en se basant sur variabilité de la longueur de pas droit en mode haptique

Conditions	Coefficient de variation de la longueur de foulée (%)		
	CV Couloir	CV Vitesse Fixe	CV Mode Haptique
Participant 11	2,98	1,74	4,03
Participant 09	2,06	1,88	3,85
Participant 05	3,02	2,44	3,9
Participant 12	3,23	1,99	4,96
Participant 14	3,35	2,12	5,55
Participant 04	1,45	1,61	5,82
Participant 15	3,01	2,37	7,57
Participant 08	3,09	2,4	10,69
Participant 10	4,73	1,74	14,65
Participant 02	3,65	1,78	12,35
Participant 13	3,81	1,64	13,99
Participant 01	3,57	2,63	20,22
Participant 07	4,01	2,4	19,1
Participant 06	3,61	2,64	22,44
Participant 03	3,4	1,61	22,91

Le tableau A I-6 exprime le CV de la longueur de foulée dans les trois conditions de marche avec correction des perturbations en mode haptique concernant les huit participants les plus variables

Coefficient de variation (CV) de la longueur de foulée (%)				
			Avant correction	Après correction
	CV Couloir	CV V Fixe	CV Mode Haptique	
Participant 11	2,98	1,74	4,03	4,03
Participant 09	2,06	1,88	3,85	3,85
Participant 05	3,02	2,44	3,9	3,9
Participant 12	3,23	1,99	4,96	4,96
Participant 14	3,35	2,12	5,55	5,55
Participant 04	1,45	1,61	5,82	5,82
Participant 15	3,01	2,37	7,57	7,57
Participant 08	3,09	2,4	10,69	4,58
Participant 10	4,73	1,74	14,65	5,98
Participant 02	3,65	1,78	12,35	5,61
Participant 13	3,81	1,64	13,99	5,26
Participant 01	3,57	2,63	20,22	9,92
Participant 07	4,01	2,4	19,1	10,64
Participant 06	3,61	2,64	22,44	13,56
Participant 03	3,4	1,61	22,91	13,33

Tableau A I-7 Représentation de la moyenne et de l'écart-type de la cadence de marche des 15 participants estimée dans les trois conditions de marche

Participants	Couloir		Tapis Vitesse fixe		Tapis Mode haptique	
Cadence (pas/min)	Moyenne	Écart- type	Moyenne	Écart- type	Moyenne	Écart- type
P 01	103	3,96	107	1,92	115	5,44
P 02	111	2,85	124	1,6	113	8,19
P 03	113	2,39	118	1,48	123	9,96
P 04	104	2,07	105	1,7	107	4,85
P 05	113	1,73	109	1,33	106	2,69
P 06	131	2,14	129	2,01	125	9,76
P 07	113	5,43	111	1,8	110	10,54
P 08	110	4,96	110	1,63	104	6,56
P 09	117	1,58	116	1,21	127	2,12
P 10	105	4,66	100	1,61	95	4,31
P 11	108	1,64	100	1,85	101	3,52
P 12	119	2,05	109	1,62	109	3,95
P 13	117	2,33	108	1,64	106	6,11
P 14	113	2	106	1,42	111	2,84
P 15	108	3,72	110	1,83	114	2,72

Figure A I-8 Représentation du CV de la cadence de marche dans trois conditions de marche du moins au plus variable en se basant sur la variabilité de la longueur de pas droit en mode haptique

Participants	Coefficient de variation de la Cadence de marche (%)		
	CV Couloir	CV Vitesse Fixe	CV Mode Haptique
Participant 11	1,51	1,85	3,5
Participant 09	1,35	1,04	1,68
Participant 05	1,53	1,22	2,54
Participant 12	1,71	1,49	3,62
Participant 14	1,77	1,34	2,56
Participant 04	1,98	1,61	4,52
Participant 15	3,43	1,66	2,4
Participant 08	4,5	1,48	6,29
Participant 10	4,44	1,62	4,53
Participant 02	2,56	1,29	7,24
Participant 13	2	1,52	5,74
Participant 01	3,85	1,8	4,72
Participant 07	4,81	1,61	9,54
Participant 06	1,63	1,56	7,78
Participant 03	2,12	1,25	8,1

Le tableau A I-9 exprime le CV de la cadence dans les trois conditions de marche avec correction des perturbations en mode haptique concernant les huit participants les plus variables

Coefficient de variation de la cadence de marche				
			Avant correction	Après correction
	CV Couloir	CV V Fixe	CV Mode Haptique	
Participant 11	1,51	1,85	3,5	3,5
Participant 09	1,35	1,04	1,68	1,68
Participant 05	1,53	1,22	2,54	2,54
Participant 12	1,71	1,49	3,62	3,62
Participant 14	1,77	1,34	2,56	2,56
Participant 04	1,98	1,61	4,52	4,52
Participant 15	3,43	1,66	2,4	2,4
Participant 08	4,5	1,48	6,29	2,96
Participant 10	4,44	1,62	4,53	2,48
Participant 02	2,56	1,29	7,24	3,64
Participant 13	2	1,52	5,74	1,99
Participant 01	3,85	1,8	4,72	2,39
Participant 07	4,81	1,61	9,54	5,15
Participant 06	1,63	1,56	7,78	4,57
Participant 03	2,12	1,25	8,1	3,82

Tableau A I-10 Représentation de la vitesse de marche des 15 participants estimée dans les trois conditions de marche

Participants	Couloir		Tapis Vitesse fixe		Tapis Mode haptique	
V foulée m/s	Moyenne	Écart- type	Moyenne	Écart- type	Moyenne	Écart- type
P 01	1,05	0,08	1,05	0,03	1,11	0,21
P 02	1,25	0,06	1,26	0,02	0,98	0,17
P 03	1,52	0,07	1,46	0,03	1,35	0,34
P 04	1,43	0,03	1,32	0,03	1,40	0,13
P 05	1,40	0,05	1,18	0,03	1,18	0,05
P 06	1,83	0,09	1,29	0,03	1,25	0,36
P 07	1,37	0,08	1,16	0,03	1,26	0,32
P 08	1,37	0,08	1,21	0,03	1,12	0,17
P 09	1,37	0,04	1,18	0,03	1,45	0,07
P 10	1,28	0,07	0,95	0,02	0,93	0,14
P 11	1,37	0,05	1,02	0,03	1,10	0,07
P 12	1,54	0,07	1,07	0,03	1,14	0,09
P 13	1,72	0,09	1,39	0,03	1,31	0,23
P 14	1,31	0,06	1,07	0,03	1,23	0,09
P 15	1,10	0,07	0,92	0,03	1,06	0,09

Tableau A I-11 Représentation du coefficient de variation de la vitesse de marche estimée dans trois conditions de marche du moins au plus variable se basant sur la variabilité de la longueur de pas droit en mode haptique

Participants	Coefficient de variation de la vitesse de foulée (%)		
	CV Couloir	CV Vitesse Fixe	CV Mode Haptique
Participant 11	3,46	2,5	6,33
Participant 09	3,18	2,4	4,81
Participant 05	3,89	2,61	4,56
Participant 12	4,48	2,52	8,15
Participant 14	4,65	2,54	7,64
Participant 04	2,21	2,42	9,61
Participant 15	6,04	3,2	8,92
Participant 08	5,54	2,39	15,27
Participant 10	5,66	2,44	15,27
Participant 02	4,48	1,83	17,29
Participant 13	5,09	2,18	17,33
Participant 01	7,58	3,06	18,96
Participant 07	6,01	2,61	25,38
Participant 06	4,95	2,39	28,39
Participant 03	4,92	2,3	25,4

Le tableau A I-12 Coefficient de variation (CV) de la vitesse de marche dans les trois conditions de marche avec correction des perturbations en mode haptique concernant les huit participants les plus variables

	Coefficient de variation de la vitesse de foulée			
			Avant correction	Après correction
	CV Couloir	CV V Fixe	CV Mode Haptique	
Participant 11	3,46	2,50	6,33	6,33
Participant 09	3,18	2,4	4,81	4,81
Participant 05	3,89	2,61	4,56	4,56
Participant 12	4,48	2,52	8,15	8,15
Participant 14	4,65	2,54	7,64	7,64
Participant 04	2,21	2,42	9,61	9,61
Participant 15	6,04	3,2	8,92	8,92
Participant 08	5,54	2,39	15,27	6,90
Participant 10	5,66	2,44	15,27	7,53
Participant 02	4,48	1,83	17,29	7,84
Participant 13	5,09	2,18	17,33	5,80
Participant 01	7,58	3,06	18,96	9,65
Participant 07	6,01	2,61	25,38	14,93
Participant 06	4,95	2,39	28,39	17,07
Participant 03	4,92	2,3	25,4	15,56

ANNEXE II

PROTOCOLE D'ACQUISITION



PROTOCOLE DÉTAILLÉ

ANALYSE DES PARAMÈTRES SPATIO-TEMPORELS DE LA MARCHE SUR UN TAPIS ROULANT INSTRUMENTÉ A DEUX VOIES À VITESSE FIXE ET EN MODE HAPTIQUE CHEZ LE SUJET VALIDE

CHERCHEUR RESPONSABLE

Rachid Aissaoui, Ing., Ph. D., Chercheur au Laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie

(LIO), École de technologie supérieure - CRCHUM

ÉTUDIANT-CHERCHEUR

Mohamed Amir Chitour, Candidat à la maîtrise en technologie de la santé, École de technologie supérieure (ÉTS), LIO CRCHUM (2016)

ORGANISME SUBVENTIONNAIRE

Regroupement stratégique INTER (Innovation en technologie de la réadaptation) du Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT)

I. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Problématique

La principale problématique de cette étude consiste à évaluer si le nouveau mode de contrôle du tapis rempli effectivement son objectif, i.e. à quel point la marche observée sur le tapis « haptique » et proche de la marche sur le sol dite « naturelle ».

Objectifs

L'objectif principal de notre étude de recherche est d'évaluer la capacité du tapis roulant haptique à générer une marche dite « naturelle ». Pour cela, il s'agira :

- De caractériser la marche « naturelle » sur le sol ;

- De comparer les caractéristiques de la marche « naturelle » aux caractéristiques observées à la marche :

 - Sur un tapis roulant à vitesse fixe

 - Sur tapis roulant en mode « haptique » à vitesse variable.

Un objectif secondaire consiste à observer dans la durée l'impact du mode de contrôle « haptique » sur la marche des sujets (environ 30 minutes).

Pour ce faire nous mènerons une expérimentation avec cinquante (50) participants volontaires sains au cours de laquelle nous évaluerons les caractéristiques de la marche (paramètres spatio-temporels et leurs variabilités) dans trois conditions expérimentales : i) la marche naturelle dans un couloir de marche d'une longueur de 50 m (situation de référence), ii) la marche sur le tapis roulant à 2 voies à vitesse imposée et enfin iii) la marche sur un tapis roulant à 2 voies avec un mode de contrôle haptique (cette dernière configuration sera évaluée sur une durée de trente minutes).

II. SITE DE RÉALISATION D'UN PROJET DE RECHERCHE

Le projet de recherche sera réalisé dans le local d'expérimentation biomécanique du LIO (Laboratoire d'imagerie en orthopédie) situé au Centre de recherche du CHUM.

III. DURÉE DU PROJET DE RECHERCHE

Le projet de recherche s'insère dans le cadre d'une maîtrise avec mémoire dirigée par le professeur Rachid Aissaoui. La durée du projet est donc estimée à 2 ans.

IV. MODE DE RECRUTEMENT DES PARTICIPANTS

Nous avons fixé un nombre de cinquante (50) participants adultes (25 hommes et 25 femmes) en bonne santé physique et mentale pour notre projet de recherche.

Les participants seront recrutés par le biais d'affiches déposées au Centre de recherche du CHUM et à l'École de technologie supérieure.

1.Critères d'inclusion

Les participants doivent être âgés de 18 et 55 ans.

Ils ne doivent souffrir d'aucune pathologie, qu'elle soit psychique (ex : maladie mentale à titre indicatif) ou physique (ex. : infirmité ou personne appareillée à titre indicatif).

Les participants doivent être capables d'effectuer un effort modéré, typiquement être capables de marcher pendant 30 minutes en continu sur un tapis roulant à vitesse confortable.

2.Critères d'exclusion

Avoir une douleur chronique qu'elle soit d'expression diurne, nocturne ou au changement de position (myopathie ou neuropathie).

Avoir des lésions d'ordre articulaire (synovite, coxarthrose, gonarthrose, entorse maligne d'une ou des deux chevilles, etc.).

Souffrir d'une insuffisance respiratoire chronique.

Souffrir d'insuffisance cardiaque qu'elle soit droite ou gauche. - Souffrir de cardiopathies obstructives.

Avoir des antécédents d'infarctus du myocarde.

Être sous traitement médical chronique (Hypertension artérielle, diabète type I ou II à titre d'exemple).

Souffrir d'une hypotension orthostatique (à la position debout). - Avoir des troubles de l'équilibre par atteinte de l'oreille interne.

Troubles cognitifs (trouble mental qui affecte plus particulièrement et principalement la mémoire).

Troubles psychiatriques (maladie psychiatrique : schizophrénie, confusion mentale, délire, etc.)

Être sous traitement médical affectant la vigilance.

Les femmes dont la grossesse est connue (impossibilité d'utiliser le harnais de sécurité à la marche).

V.DÉROULEMENT DES ACQUISITIONS

Dans un premier temps, la mesure des caractéristiques de la marche se fera le long d'un couloir mesurant environ cinquante mètres de long. Ces mesures se feront à l'aide d'un système de capteurs inertiels combinant des accéléromètres, des gyroscopes et des magnétomètres qui a l'avantage de permettre une mesure ambulatoire (Xsens, Inc).

Dans un deuxième temps, les mesures de ces mêmes paramètres se feront sur un tapis roulant haptique à deux voies de type AMTI équipé de plates-formes à 6 degrés de liberté pour chaque voie. Les paramètres seront enregistrés par un système de capture du mouvement à 12 caméras optoélectroniques en 3D (Nexus, VICON®). Le système de capteurs inertiels est en effet difficilement utilisable sur le tapis du fait des perturbations électromagnétiques induites par les moteurs.

Le déroulement des expérimentations est le suivant :

Une fois les participants arrivés dans le local du laboratoire d'expérimentation, un membre de l'équipe de recherche vérifiera les critères d'inclusion et d'exclusion. Ensuite, ils devront signer le formulaire d'information et de consentement et le personnel de recherche recueillera les données anthropométriques (âge, sexe, poids).

Par la suite, les participants marcheront naturellement, le long d'un couloir de 50 mètres environ, ils seront pourvus du système inertiel (Xsens) afin d'enregistrer les caractéristiques spatio-temporelles de la marche naturelle. Une période d'adaptation de 5 minutes sera proposée avant l'enregistrement afin de familiariser les participants à la tâche et à l'équipement. Par la suite, nous demanderons aux participants de parcourir deux allers-retours au cours desquels les données seront collectées.

Dans un troisième temps, ces mêmes participants seront dotés de marqueurs réfléchissants. Ils devront marcher sur un tapis roulant instrumenté de type AMTI à deux voies pourvu de plateformes dynamométriques pendant une période d'adaptation d'environ 5 minutes à vitesse constante. Cette vitesse, dite confortable, sera établie selon un procédé sélectif développé au LIO : on démarre à une vitesse de marche de 0.7 m/s et on incrémente cette vitesse graduellement jusqu'à ce que le participant décide d'une vitesse qui lui est confortable. Ce choix est bien entendu subjectif. L'opérateur fera varier la vitesse en fonction du ressenti de chaque participant afin de trouver une vitesse de confort. Une période d'adaptation de 5 minutes sera proposée aux participants pour se familiariser à la marche sur le tapis. Il s'en

suivra une phase de test pendant laquelle le sujet devra marcher à cette vitesse constante pendant 5 minutes.

Pour finir, le mode de fonctionnement haptique sera sélectionné, c'est-à-dire que les participants marcheront de manière naturelle et les deux voies du tapis s'ajusteront automatiquement à cette démarche grâce aux plateformes dynamométriques. Là aussi une période d'adaptation de 5 minutes est prévue. La phase de test débutera à l'issue de cette période d'adaptation. Sa durée est de trente (30) minutes. Au cours de cette phase, les données seront collectées lors de 6 acquisitions d'une durée de 4 mn chacune.

Au total, la durée de la marche sur le tapis est évaluée à 50 minutes.

VI. ANALYSE DES RÉSULTATS.

La marche sera caractérisée à l'aide des paramètres spatio-temporels suivants : la mesure de la longueur de pas droit et gauche, la longueur de cycle, la longueur de foulée, l'enjambée, le temps de pas, l'angle du pas, la largeur du pas, le temps de cycle, la cadence, la vitesse de marche, les forces de réaction au sol (forces antéro-postérieures, médio-latérales et verticales) et les centres de pression de chaque pied. Des variables non linéaires appliquées sur les séries temporelles seront utilisées tels que le CoD (Corrélation dimensions), l'exposant de Lyapounov (Lye) ainsi que l'approximation de l'entropie qui décrivent le comportement dynamique du sujet durant la marche.

Traitement statistique des données :

Lors de cette étude, on aura recours à des statistiques descriptives incluant des mesures de tendance centrale (la moyenne, la médiane) et de dispersion (l'écart-type, l'étendue). Le calcul de la fréquence sera utilisé pour interpréter les caractéristiques démographiques et cliniques de l'échantillon étudié.

Des tests statistiques plus poussés seront aussi utilisés pour étudier les différences entre les trois conditions de marche (marche naturelle au sol, tapis à vitesse fixe et tapis haptique) sur chacune des variables dépendantes en utilisant une analyse de variance à mesures répétées. L'hypothèse soumise ici est que le comportement du participant sur le tapis haptique ressemble plus au comportement dans la condition naturelle (au sol) que le comportement à vitesse fixe.

VII. CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUES

Ce projet est soumis aux comités d'éthique de la recherche du Centre hospitalier de l'Université de Montréal et de l'École de technologie supérieure. Les principes éthiques fondamentaux ainsi que les lignes directrices des trois conseils seront respectés durant ce projet. Tous les participants recrutés durant cette étude participeront de façon volontaire et pourront se retirer à tout moment. La nature des évaluations, leur déroulement ainsi que les risques relatifs à la participation à cette étude seront expliqués aux participants lors de la signature du formulaire de consentement.

Toutes les informations recueillies lors de cette étude demeureront confidentielles, dans les limites prévues par la loi. Les participants seront désignés par un code tout au long de l'étude. La liste des participants et leurs informations personnelles seront conservées au LIO par le chercheur responsable pour une période de 10 ans. Seules les personnes autorisées y auront accès. Ensuite, les informations personnelles sur les participants ainsi que tout moyen de les identifier seront détruits.

VIII. FINANCEMENT

Ce projet est financé en grande partie par le Regroupement stratégique INTER (Innovation et Technologie en Réadaptation) du Fonds FRQNT détenu par le professeur Rachid Aissaoui.

ANNEXE III

FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

TITRE DU PROJET DE RECHERCHE	ANALYSE DES PARAMÈTRES SPATIO-TEMPORELS DE LA MARCHE SUR UN TAPIS ROULANT INSTRUMENTÉ A DEUX VOIES À VITESSE FIXE ET EN MODE HAPTIQUE CHEZ LE SUJET VALIDE
CHERCHEUR RESPONSABLE	Rachid Aissaoui, Ing., Ph. D., Professeur-Chercheur, École de technologie supérieure - Laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie (LIO), Centre de recherche du CHUM (CRCHUM)
ÉTUDIANT-CHERCHEUR	Mohamed Amir Chitour, Candidat à la maîtrise, École de technologie supérieure, LIO-CRCHUM
ORGANISMES SUBVENTIONNAIRES	Regroupement stratégique INTER (Innovation en technologie de la réadaptation) du Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT)
NO DE PROJET AU CHUM	16.402
NO DE PROJET À L'ÉTS	H20170101

1. PRÉAMBULE

Nous sollicitons votre participation à un projet de recherche parce que vous êtes un(e) adulte en bonne santé. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet et de signer ce formulaire d'information et de consentement, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Ce formulaire peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles au chercheur responsable du projet ou aux autres membres du personnel affecté au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

2. NATURE ET OBJECTIFS DU PROJET

La marche peut être définie comme un mouvement de déplacement de l'ensemble du corps. Pour être analysée, la marche est découpée selon un cycle commençant par le contact d'un pied au sol et finissant par le contact subséquent de ce même pied.

Lorsque nous marchons le long d'un couloir, nous avons tendance à adopter naturellement une vitesse dite « confortable ». Cette vitesse n'est pas constante et varie légèrement au cours du déplacement. À l'inverse, lorsque nous marchons sur un tapis roulant classique, nous devons nous adapter au rythme constant de celui-ci, et ce même si la vitesse choisie est notre vitesse confortable. Il a d'ailleurs été démontré que lors de la marche sur tapis roulant classique, la longueur des pas est plus courte et la fréquence des pas est plus grande.

Pour tenter de corriger ce problème, le Laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie (LIO) a développé un nouveau mode de contrôle du tapis roulant, dit « haptique ». Dans ce mode de contrôle, la vitesse du tapis n'est plus imposée par l'expérimentateur, mais déterminée par l'action de l'utilisateur sur le tapis. Ce mode fait donc en sorte que le tapis s'adapte constamment au rythme et à la vitesse du participant, ce qui permet de s'approcher davantage de la marche naturelle.

Le but de ce projet de recherche est d'évaluer à quel point la marche sur le tapis fonctionnant en mode « haptique » est comparable à la marche naturelle.

3. NOMBRE DE PARTICIPANT(E)S ET DURÉE DE LA PARTICIPATION

Au total, cinquante (50) participants en bonne santé seront recrutés. Votre participation se déroulera en une seule séance d'une durée approximative de 2h15.

4. NATURE DE LA PARTICIPATION DEMANDÉE

Si vous acceptez de participer au projet de recherche, et après avoir signé le présent formulaire d'information et de consentement, votre participation consistera à marcher le long d'un couloir de marche et sur un tapis roulant en mode normal, puis en mode « haptique », afin que nous puissions enregistrer les paramètres spatio-temporels associés à la marche (longueur de pas, cadence, vitesse de marche, durée d'un cycle de marche, etc.). Votre participation se déroulera dans les locaux du Centre de recherche du CHUM (CRCHUM).

5. DÉROULEMENT DU PROJET/PROCÉDURES

Vous trouverez un tableau des procédures à l'étude à la fin du présent formulaire.

Ce projet de recherche comporte cinq (5) phases :

1. Phase de détermination de l'éligibilité ;
2. Phase de marche le long d'un couloir ;
3. Phase de préparation à la marche sur tapis roulant ;
4. Phase de marche sur tapis roulant – Mode normal ;
5. Phase de marche sur tapis roulant – Mode (haptique)

Pour assurer le bon déroulement des phases et la qualité des données enregistrées, il vous sera demandé d'apporter une paire de short, un tee-shirt ample, ainsi que des souliers de marche/course qui ne couvrent pas les chevilles.

a. Phase de détermination de l'éligibilité (Durée : 10 min)

Avant de commencer, suite à la présentation du projet de recherche, à l'explication du formulaire de consentement et à sa signature, le personnel de recherche vous posera des questions portant sur votre état de santé général afin de confirmer que vous répondez bien aux critères d'éligibilité pour participer à l'étude. Vos données anthropométriques (taille, poids, âge) seront également recueillies.

Dans l'éventualité où vous ne remplissez pas les critères d'éligibilité, il ne vous sera pas possible de prendre part à l'étude.

b. Phase de marche le long d'un couloir (Durée : 30 min)

Si les critères vérifiés au cours de la phase de détermination d'éligibilité démontrent que vous êtes éligible à participer à ce projet, nous vous demanderons dans un premier temps de revêtir les vêtements et souliers recommandés.

Ensuite, le personnel de recherche installera sur l'ensemble de votre corps un système de capteurs inertiels composé de plusieurs unités qui s'attachent aux différentes parties du corps grâce à des velcros (Figure 1). Ce système permet d'enregistrer le mouvement en trois dimensions (3D) des différents segments du corps et ainsi de calculer les paramètres spatio-temporels de la marche.



Figure 1 : Système de capteurs inertiels Xsens MNV pour l'analyse du mouvement (Xsens)

Une fois le système installé, le personnel de recherche vous demandera de marcher le long d'un couloir de marche de 59 mètres afin de vous familiariser avec le système et l'environnement. Cette période d'adaptation durera 5 minutes.

Le personnel de recherche procédera ensuite à l'enregistrement des données. Vous devrez parcourir deux allers-retours le long du couloir, en continu, afin que toutes les données soient collectées.

L'enregistrement terminé, le personnel de recherche retirera le système de capteurs inertiels et une pause de 5 minutes vous sera accordée.

c. Phase de préparation à la marche sur le tapis roulant (Durée : 25 min)

La troisième phase consiste à préparer la marche sur le tapis roulant. Pour cela, le personnel de recherche procédera dans un premier temps à l'installation de marqueurs réfléchissants qui permettront d'enregistrer les mouvements 3D de votre corps sur le tapis. En effet, le système de capteurs inertiels utilisé durant la phase précédente ne fonctionne pas sur le tapis en raison des perturbations électromagnétiques induites par les moteurs.

Ensuite, vous serez équipé(e) d'un harnais médical de sécurité couramment utilisé lors de la marche sur tapis roulant (Figure 2). Cette mesure vise à éliminer le risque de chute.

Il vous sera ensuite demandé de prendre place sur le tapis roulant. Vous commencerez à marcher et le personnel de recherche augmentera de façon progressive la vitesse du tapis jusqu'à atteindre une vitesse qui vous semble confortable. Vous continuerez à marcher sur le tapis à cette vitesse pendant 5 minutes afin de vous habituer à la marche sur le tapis.



Figure 2 : Harnais médical M130 pour la marche sur tapis roulant (Robertsonn Harness Inc.)

d. Phase de marche sur le tapis roulant – Mode normal (Durée : 15 min)

Lorsque la période d'adaptation au tapis sera terminée, le personnel de recherche vous demandera de continuer à marcher en conservant la même vitesse pendant 5 autres minutes, et ce afin de procéder à l'enregistrement des données.

Après une courte vérification des données enregistrées, le personnel de recherche vous proposera une pause de 5 minutes.

e. Phase de marche sur le tapis roulant – Mode « haptique » (Durée : 55 min)

Le personnel de recherche vous demandera de remonter sur le tapis et de commencer à marcher. La vitesse du tapis sera d'abord fixée par le personnel de recherche (vitesse confortable) puis le mode haptique sera enclenché. À partir de ce moment-là, le tapis réagira à votre marche et sa vitesse s'ajustera automatiquement et continuellement à votre cadence. Une période d'adaptation de 5 minutes vous sera proposée.

Vous marcherez ensuite pendant une période de 30 minutes au cours de laquelle 6 enregistrements de 4 minutes chacun seront effectués. Ces enregistrements seront répartis tout au long de la période de marche afin de suivre l'évolution des paramètres spatio-temporels dans le temps.

Après une courte vérification des données enregistrées, vous pourrez descendre du tapis et l'ensemble du matériel sera retiré. Vous pourrez vous changer et la compensation financière vous sera remise.

6. MISE EN BANQUE DES DONNÉES DE RECHERCHE COLLECTÉES À DES FINS DE RECHERCHE FUTURE (FACULTATIF)

Si vous y consentez, les données biomécaniques issues de votre participation au projet seront mises en banque et pourront être utilisées à des fins de recherche sur le développement d'outils d'analyse morphologique et fonctionnelle du système locomoteur. Il s'agit d'un volet facultatif de cette étude principale. Vous pouvez donc refuser que l'on mette en banque vos données et participer quand même à l'étude principale.

Veuillez prendre connaissance du formulaire d'information et de consentement distinct relatif à la mise en banque facultative des données biomécaniques concernant les modalités de participation.

7. **VOS RESPONSABILITÉS ET PRÉCAUTIONS À PRENDRE**

En signant le présent formulaire d'information et de consentement, vous acceptez de suivre les consignes émises par l'équipe de recherche de vous présenter aux visites prévues en lien avec l'étude et de vous soumettre à toutes les évaluations requises dans le cadre de l'étude.

8. **RISQUES ET INCONVÉNIENTS**

Il n'y a pas de risques majeurs associés à la participation au projet.

La marche sur le tapis roulant peut engendrer un certain déséquilibre et donc un risque de chute, surtout lors de la période d'adaptation. Vous serez en tout temps attaché(e) par un harnais suspendu au plafond, ce qui préviendra le risque de chute.

Il peut exister un léger risque de fatigue dû à la marche prolongée (phase 5). Des périodes de pause vous seront proposées régulièrement pour en diminuer le risque et atténuer les effets.

L'utilisation du système de capteurs inertiels ne comporte aucun risque. Le système est léger et facile à porter. Si le port du système engendre un inconfort durant l'expérimentation, vous devrez en avvertir immédiatement le personnel de recherche qui procédera à des ajustements.

L'utilisation des marqueurs réfléchissants ne comporte aucun risque. En revanche, le fait que les marqueurs soient collés à même la peau peut engendrer un inconfort. Si vous constatez un inconfort persistant, une rougeur ou un gonflement, vous devrez en avvertir immédiatement le personnel de recherche qui pourra mettre fin à l'expérimentation. Le retrait des marqueurs peut aussi générer un inconfort, notamment chez les personnes présentant une forte pilosité. L'inconfort se dissipe peu de temps après le retrait des marqueurs.

9. **AVANTAGES**

Il se peut que vous retiriez un bénéfice personnel de votre participation à ce projet de recherche, mais nous ne pouvons vous l'assurer. À tout le moins, les résultats obtenus contribueront à l'avancement des connaissances dans ce domaine.

10. **CONFIDENTIALITÉ**

Durant votre participation à ce projet de recherche, le chercheur responsable de ce projet ainsi que les membres de son personnel de recherche recueilleront, dans un dossier de

recherche, les renseignements vous concernant et nécessaires pour répondre aux objectifs scientifiques de ce projet de recherche.

Ces renseignements peuvent comprendre votre nom, votre sexe et votre date de naissance.

Tous les renseignements recueillis demeureront confidentiels dans les limites prévues par la loi. Vous ne serez identifié(e) que par un numéro de code. La clé du code reliant votre nom à votre dossier de recherche sera conservée par le chercheur responsable de ce projet de recherche.

Les données de recherche seront conservées pendant au moins 10 ans par le chercheur responsable de ce projet de recherche. Vos renseignements personnels seront conservés pendant un maximum de 3 ans après la fin du projet de recherche, après quoi ils seront détruits.

Les données de recherche pourront être publiées ou faire l'objet de discussions scientifiques, mais il ne sera pas possible de vous identifier.

Vous avez le droit de consulter votre dossier de recherche pour vérifier les renseignements recueillis et les faire rectifier au besoin.

11. COMMUNICATION DES RÉSULTATS GÉNÉRAUX

Vous pourrez connaître les résultats généraux de cette étude si vous en faites la demande au chercheur principal à la fin de l'étude. Les résultats vous seront communiqués par courriel ou par lettre postale selon votre convenance.

12. POSSIBILITÉ DE COMMERCIALISATION

Votre participation au projet de recherche pourrait mener à la création de produits commerciaux qui pourraient être éventuellement protégés par voie de brevet ou autres droits de propriété intellectuelle. Cependant, dans un tel cas, vous ne pourrez en retirer aucun avantage financier.

13. FINANCEMENT DU PROJET

Le chercheur responsable du projet et l'établissement ont reçu un financement de l'organisme subventionnaire pour mener à bien ce projet de recherche.

14. COMPENSATION

En guise de compensation pour les frais encourus en raison de votre participation au projet de recherche, vous recevrez un montant de 20\$. Si vous vous retirez du projet (ou s'il est mis fin à votre participation) avant qu'il ne soit complété, la compensation sera proportionnelle à la durée de votre participation.

15. EN CAS DE PRÉJUDICE

Si vous deviez subir quelque préjudice que ce soit à la suite d'une procédure reliée à l'étude, vous recevrez tous les soins et services requis par votre état de santé.

En acceptant de participer à ce projet de recherche, vous ne renoncez à aucun de vos droits et vous ne libérez pas le chercheur responsable de ce projet de recherche, l'organisme subventionnaire et l'établissement de leur responsabilité civile et professionnelle.

16. PARTICIPATION VOLONTAIRE ET POSSIBILITÉ DE RETRAIT

Votre participation à ce projet de recherche est volontaire. Vous êtes donc libre de refuser d'y participer. Vous pouvez également vous retirer de ce projet à n'importe quel moment, sans avoir à donner de raisons, en informant l'équipe de recherche.

Le chercheur responsable de ce projet de recherche, le comité d'éthique de la recherche, l'organisme subventionnaire peuvent mettre fin à votre participation, sans votre consentement. Cela peut se produire si de nouvelles découvertes ou informations indiquent que votre participation au projet n'est plus dans votre intérêt, si vous ne respectez pas les consignes du projet de recherche ou encore s'il existe des raisons administratives d'abandonner le projet.

Si vous vous retirez du projet ou êtes retiré(e) du projet, l'information et le matériel déjà recueillis dans le cadre de ce projet seront néanmoins conservés, analysés ou utilisés pour assurer l'intégrité du projet.

Toute nouvelle connaissance acquise durant le déroulement du projet qui pourrait avoir un impact sur votre décision de continuer à participer à ce projet vous sera communiquée rapidement.

17. IDENTIFICATION DES PERSONNES-RESSOURCES

Si vous avez des questions ou éprouvez des problèmes en lien avec le projet de recherche, ou si vous souhaitez vous en retirer, vous pouvez communiquer avec le chercheur responsable, Rachid Aissaoui, ou avec une personne de l'équipe de recherche au numéro suivant : (514) 890-8000, poste 25218 (du lundi au vendredi, de 9h à 16h).

Pour toute question concernant vos droits en tant que sujet participant à ce projet de recherche ou si vous avez des plaintes ou des commentaires à formuler vous pouvez communiquer avec :

- Le Président du Comité d'éthique de la recherche de l'École de technologie supérieure : **(514) 396-8730**.
- Le commissaire local aux plaintes et à la qualité des services de l'Hôpital St-Luc du CHUM : **(514) 890-8000**, poste **26047**.

SIGNATURE

Engagement du (de la) participant(e) à la recherche

J'ai pris connaissance du formulaire d'information et de consentement. On m'a expliqué le projet de recherche et le présent formulaire d'information et de consentement. On a répondu à mes questions et on m'a laissé le temps voulu pour prendre une décision. Après réflexion, je consens à participer à ce projet de recherche aux conditions qui y sont énoncées.

Nom (en lettres moulées)

Signature du(de la) participant(e)

Date

Engagement de la personne qui obtient le consentement (*si différente du chercheur principal*)

J'ai expliqué au (à la) participant(e) à la recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement et j'ai répondu aux questions qu'il(elle) m'a posées.

Nom (en lettres moulées)

*Signature de la personne qui
obtient le consentement*

Date

Engagement du (de la) chercheur(se) responsable

Je certifie qu'on a expliqué au (à la) participant(e) à la recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement, que l'on a répondu aux questions que le sujet de recherche avait.

Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au formulaire d'information et de consentement et à en remettre une copie signée et datée au(à la) participant(e) à la recherche.

Nom (en lettres moulées)

*Signature du (de la) chercheur(se)
responsable*

Date

SIGNATURE D'UN TÉMOIN OUI ☐ NON ☐

La signature d'un témoin est requise pour les raisons suivantes :

Difficulté ou incapacité à lire - La personne (témoin impartial) qui appose sa signature ci-dessous atteste qu'on a lu le formulaire de consentement et qu'on a expliqué précisément le projet au (à la) participant(e), qui semble l'avoir compris.

Incompréhension de la langue du formulaire de consentement - La personne qui appose sa signature ci-dessous a fait fonction d'interprète pour le(la) participant(e) au cours du processus visant à obtenir le consentement.

Nom (en lettres moulées)

Signature du témoin

Date

IMPORTANT

Consigner dans le dossier de recherche du (de la) participant(e), le cas échéant, d'autres renseignements sur l'aide fournie au cours du processus visant à obtenir le consentement.

Récapitulatif des différentes phases et de leur durée

Phase	Nom de la phase	Durée
1	Détermination de l'éligibilité et questionnaires	10 min
2	<u>Phase de marche le long d'un couloir</u> <ul style="list-style-type: none"> • Installation du système de capteurs inertiels et test de leur bon fonctionnement • Période d'adaptation au système • Enregistrement des données (2 allers-retours) • Repos 	15 min 05 min 05 min 05 min
3	<u>Phase de préparation à la marche sur tapis roulant</u> <ul style="list-style-type: none"> • Installation des marqueurs réfléchissants • Installation du harnais de sécurité • Détermination de la vitesse de marche confortable • Période d'adaptation à la marche sur tapis 	15 min 05 min 05 min 05 min
4	<u>Phase de marche sur tapis – Mode normal</u> <ul style="list-style-type: none"> • Enregistrement des données • Vérification rapide des données • Repos 	05 min 05 min 05 min
5	<u>Phase de marche sur tapis – Mode « haptique »</u> <ul style="list-style-type: none"> • Période d'adaptation au mode haptique • Enregistrements des données (6 * 4 minutes) • Vérification rapide des données • Retrait du matériel 	05 min 30 min 05 min 10 min

APPROBATION PAR LE COMITÉ D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE

Les comités d'éthique de la recherche du CHUM et de l'ÉTS ont approuvé le projet et en assureront le suivi.

ANNEXE IV

QUESTIONNAIRE QUALITATIF SUR LA MARCHÉ SUR CORRIDOR VS MARCHÉ SUR TAPIS ROULANT

Questionnaire qualitatif sur la marche sur corridor

VS

Marche sur tapis roulant

Projet : ÉVALUATION ET ANALYSE DES PARAMÈTRES SPATIO TEMPORELS DE LA MARCHÉ SUR
PARTICIPANT SAINS LE LONG D'UN COULOIR ET SUR UN TAPIS ROULANT ORTHOPÉDIQUE À DEUX
VOIES EN MODE AUTOMATIQUE ET HAPTIQUE

Code participant :

Responsable Acquisition :

Lieu :

Date :

Heure :

Veuillez s'il vous plaît répondre au questionnaire en entourant une des valeurs numériques
de cette échelle :

Sachant que :

1 représente que vous n'êtes du tout pas d'accord

Et

10 que vous êtes tout à fait d'accord en regard de l'énoncé.

1. Lors de la marche le long d'un corridor étant pourvu (de capteurs inertiels du système Xsens, du système d'attache Velcros et du harnais), ressentiez-vous vous une sensation d'inconfort ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

2. À quel point étiez-vous confortable sur le tapis durant les enregistrements en mode vitesse fixe ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

3. À quel point étiez-vous confortable sur le tapis durant les enregistrements en mode vitesse haptique ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

4. Aviez-vous un sentiment d'insécurité sur le tapis en mode vitesse fixe bien qu'attacher au harnais de sécurité ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

5. Aviez-vous un sentiment d'insécurité sur le tapis en mode vitesse haptique bien qu'attaché au harnais de sécurité ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

6. Est-ce que vous aviez l'impression d'être en contrôle du tapis en mode haptique ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

7. Est-ce que la vitesse du tapis à vitesse fixe vous semblait naturelle par rapport à votre démarche sur le corridor ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

8. Pensez-vous que la vitesse sur tapis à vitesse fixe était plus rapide comparativement à votre vitesse naturelle sur le corridor ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

9. Est-ce que la période d'adaptation sur le tapis était difficile en mode vitesse fixe ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

10. Est-ce que la période d'adaptation sur le tapis était difficile en mode haptique ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

11. Avez-vous ressenti la transition du mode vitesse fixe vers le mode haptique lors de la marche sur le tapis roulant ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

12. Avez-vous été perturbé par le bruit des deux courroies des moteurs entraînant le tapis au courant de la marche sur tapis ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

13. Est-ce que le bruit des deux moteurs du tapis a influencé votre façon de marcher ?

1 : du tout pas (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10) 10 : Tout à fait

Notes et commentaires :

CONTRIBUTIONS

Chitour, Mohamed Amir ; Parent, Gérald ; Thomas, Robert ; Labbé, David ; Aissaoui, Rachid ; Analyse des paramètres spatio-temporels de la marche sur un tapis roulant instrumenté à deux voies à vitesse fixe et en mode haptique chez le sujet valide, Acceptation d'un résumé en vue d'une présentation poster au 3^{ème} Congrès Québécois de Recherche en Adaptation-Réadaptation (Centre Mont-Royal, Mai 2019, Montréal).

Chitour, Mohamed Amir ; Charbonneau, Philippe ; Thomas, Robert ; Labbé, David ; Aissaoui, Rachid, Analysis of spatio-temporal parameters during gait on a double belt instrumented treadmill in fixed speed and self paced modes in healthy adults, Présentation e-poster au 39^{ème} Congrès international d'orthopédie (SICOT) (Montréal, Octobre 2018).

Charbonneau, P., Chitour, M., Robert, T., Cote, S. S.-P., Aissaoui, R., & Labbe, D. (2018). Evaluation of the impact of a virtual self-avatar on gait parameters. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 61, e65-e66.

Chitour, Mohamed Amir ; Charbonneau, Philippe ; Thomas, Robert ; Labbé, David ; Aissaoui, Rachid, Analyse des paramètres spatio-temporels de la marche sur un tapis roulant instrumenté à deux voies à vitesse fixe et en mode haptique chez le sujet valide, présentation podium à la 38^{ème} journée de la recherche du POES et de la division d'orthopédie de l'université de Montréal, tenue à l'hôpital Sainte Justine de Montréal (Montréal, mai 2018).

Chitour, Mohamed Amir ; Charbonneau, Philippe ; Thomas, Robert ; Labbé, David ; Aissaoui, Rachid, Analyse des paramètres spatio-temporels de la marche sur un tapis roulant instrumenté à deux voies à vitesse fixe et en mode haptique chez le sujet valide, 20^{ème} congrès annuel des étudiants du CRCHUM, présentation poster (Montréal, mai 2018).

Chitour, Mohamed Amir ; Charbonneau, Philippe ; Thomas, Robert ; Labbé, David ; Aissaoui, Rachid, Matinées de présentations éclair (Ma thèse en 180 secondes) du LIO (CRCHUM), Analyse des paramètres spatio-temporels de la marche sur un tapis roulant instrumenté à deux voies à vitesse fixe et en mode haptique chez le sujet valide (Montréal, février 2018)

BIBLIOGRAPHIE

- Alton, F., Baldey, L., Caplan, S., & Morrissey, M. (1998). A kinematic comparison of overground and treadmill walking. *Clinical biomechanics*, 13(6), 434-440.
- Armand, S. (2005). *Analyse Quantifiée de la Marche: extraction de connaissances à partir de données pour l'aide à l'interprétation clinique de la marche digitigrade*. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- Baker, R. (2006). Gait analysis methods in rehabilitation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 3(1), 4.
- Berceanu, C., Marghitu, D., Gudavalli, M., Raju, P., & Vikas, Y. (2016). Gait analysis parameters of healthy human subjects with asymmetric loads. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 19(8), 855-863.
- Carcreff, L., Bonnefoy-Mazure, A., De Coulon, G., & Armand, S. (2016). Analyse quantifiée de la marche. *Movement & Sport Sciences*(3), 7-21.
- Chao, E., Laughman, R., Schneider, E., & Stauffer, R. (1983). Normative data of knee joint motion and ground reaction forces in adult level walking. *Journal of biomechanics*, 16(3), 219-233.
- Dingwell, J., Cusumano, J., Cavanagh, P., & Sternad, D. (2001). Local dynamic stability versus kinematic variability of continuous overground and treadmill walking. *Journal of biomechanical engineering*, 123(1), 27-32.
- Feasel, J., Whitton, M. C., Kassler, L., Brooks, F. P., & Lewek, M. D. (2011). The integrated virtual environment rehabilitation treadmill system. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 19(3), 290-297.
- Gouelle, A., Leroux, J., Bredin, J., & Mégrot, F. (2016). Changes in gait variability from first steps to adulthood: normative data for the gait variability index. *Journal of motor behavior*, 48(3), 249-255.
- Gouelle, A., & Mégrot, F. (2017). Interpreting Spatiotemporal Parameters, Symmetry, and Variability in Clinical Gait Analysis. *Handbook of Human Motion*, 1-20.
- Gouelle, A., Mégrot, F., Presedo, A., Husson, I., Yelnik, A., & Penneçot, G.-F. (2013). The gait variability index: a new way to quantify fluctuation magnitude of spatiotemporal parameters during gait. *Gait & posture*, 38(3), 461-465.
- Gourdou, P. (2010). *Étude de l'influence de l'asymétrie de vitesse du tapis roulant à deux courroies sur la biomécanique de la locomotion chez le sujet sain*. École de technologie supérieure.

- Hausdorff, J. M. (2005). Gait variability: methods, modeling and meaning. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 2(1), 19.
- Harris-Love, M. L., Forrester, L. W., Macko, R. F., Silver, K. H., & Smith, G. V. (2001). Hemiparetic gait parameters in overground versus treadmill walking. *Neurorehabilitation and neural repair*, 15(2), 105-112.
- Hirokawa, S. (1989). Normal gait characteristics under temporal and distance constraints. *Journal of biomedical engineering*, 11(6), 449-456.
- Hollman, J. H., Watkins, M. K., Imhoff, A. C., Braun, C. E., Akervik, K. A., & Ness, D. K. (2016). A comparison of variability in spatiotemporal gait parameters between treadmill and overground walking conditions. *Gait & posture*, 43, 204-209.
- Kang, J., Chaloupka, E. C., Mastrangelo, A. M., & Hoffman, J. R. (2002). Physiological and biomechanical analysis of treadmill walking up various gradients in men and women. *European journal of applied physiology*, 86(6), 503-508.
- Lauzière, S., Miéville, C., Duclos, C., Aissaoui, R., & Nadeau, S. (2014). Perception threshold of locomotor symmetry while walking on a split-belt treadmill in healthy elderly individuals. *Perceptual and motor skills*, 118(2), 475-490.
- Lee, S. J., & Hidler, J. (2008). Biomechanics of overground vs. treadmill walking in healthy individuals. *Journal of Applied Physiology*, 104(3), 747-755.
- Marcoux, S. (2015). *Contrôle haptique d'un tapis roulant orthopédique*. École de technologie supérieure.
- De Guise, J. A., Mezghani, N., Aissaoui, R., & Hagemester, N. (2011). New comprehensive methods for the biomechanical analysis of knee osteoarthritis. Dans J. M. Pelletier & J. P. Pelletier, *Understanding Osteoarthritis from Bench to Bedside*, (Chapitre. 6, pp. 85-102). Kerala, India: Research Singnpost.
- Masani, K., Kouzaki, M., & Fukunaga, T. (2002). Variability of ground reaction forces during treadmill walking. *Journal of applied physiology*, 92(5), 1885-1890.
- Murray, M., Spurr, G., Sepic, S., Gardner, G., & Mollinger, L. (1985). Treadmill vs. floor walking: kinematics, electromyogram, and heart rate. *Journal of Applied Physiology*, 59(1), 87-91.
- Oberg, T., Karsznia, A., & Oberg, K. (1993). Basic gait parameters: reference data for normal subjects, 10-79 years of age. *Journal of rehabilitation research and development*, 30(2), 210-223.
- Perry, J., & Schoneberger, B. (1992). *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*: SLACK.
- Roetenberg, D., Luinge, H., & Slycke, P. (2009). Xsens MVN: full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors. *Xsens Motion Technologies BV, Tech. Rep*, 1.

- Riley, P. O., Paolini, G., Della Croce, U., Paylo, K. W., & Kerrigan, D. C. (2007). A kinematic and kinetic comparison of overground and treadmill walking in healthy subjects. *Gait & posture*, 26(1), 17-24.
- Sloot, L., Van der Krogt, M., & Harlaar, J. (2014). Self-paced versus fixed speed treadmill walking. *Gait & posture*, 39(1), 478-484.
- Stolze, H., Kuhtz-Buschbeck, J., Mondwurf, C., Boczek-Funcke, A., Jöhnk, K., Deuschl, G., & Illert, M. (1997). Gait analysis during treadmill and overground locomotion in children and adults. *Clinical Neurophysiology*, 105(6), 490-497.
- Van de Putte, M., Hagemeister, N., St-Onge, N., Parent, G., & de Guise, J. A. (2006). Habituation to treadmill walking. *Bio-medical materials and engineering*, 16(1), 43-52.
- Wass, E., Taylor, N. F., & Matsas, A. (2005). Familiarisation to treadmill walking in unimpaired older people. *Gait & posture*, 21(1), 72-79.
- Willems, P., Schepens, B., & Detrembleur, C. (2012). Marche normale. EMC. Dans EMC (Elsevier SAS, 26-007-B-75). Paris: Masson.
- Windolf, M., Götzen, N., & Morlock, M. (2008). Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems—exemplified on the Vicon-460 system. *Journal of biomechanics*, 41(12), 2776-2780.
- Yamasaki, Y., Kodama, M., Matsuhisa, M., Kishimoto, M., Ozaki, H., Tani, A., . . . Kamada, T. (1996). Diurnal heart rate variability in healthy subjects: effects of aging and sex difference. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 271(1), H303-H310.
- Yang, F., & King, G. A. (2016). Dynamic gait stability of treadmill versus overground walking in young adults. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 31, 81-87.
- Yang, P.-F., Sanno, M., Brüggemann, G.-P., & Rittweger, J. (2012). Evaluation of the performance of a motion capture system for small displacement recording and a discussion for its application potential in bone deformation in vivo measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 226(11), 838-847.
- Zeni, J. A., & Higginson, J. S. (2010). Gait parameters and stride-to-stride variability during familiarization to walking on a split-belt treadmill. *Clinical biomechanics*, 25(4), 383-386.
- Zong, C. (2012). *Système embarqué de capture et analyse du mouvement humain durant la marche*. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.