

Évaluation de l'impact de l'incarnation d'un égo-avatar temps réel sur la marche

par

PHILIPPE CHARBONNEAU

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

MONTRÉAL, LE 16 OCTOBRE 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Philippe Charbonneau, 2019



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. David Labbé, directeur de mémoire

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

M. Sheldon Andrews, président du jury

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

M. Rachid Aissaoui, membre du jury

Département de génie des systèmes à l'école de technologie supérieure

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

LE 18 SEPTEMBRE 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

En premier lieu, j'aimerais remercier mon directeur, M. David Labbé, de m'avoir donné la chance de travailler sur ce projet de recherche et de m'avoir fait confiance même dans les moments moins faciles. Merci de m'avoir poussé afin de mener à terme ce projet, même lorsque ma motivation était plus difficile à trouver!

J'aimerais également remercier deux personnes ayant participé activement dans la réalisation de ce projet, Sara Saint-Pierre Côté et Gérald Parent. Sara pour son support et son aide dans l'élaboration des tâches, ainsi que pour ton agréable compagnie tout au long de ce projet, ta présence à rendu le tout plus facile et plus drôle. Gérald pour ton aide irremplaçable lors de l'élaboration, l'analyse et la réalisation des solutions aux multiples problèmes rencontrés.

J'aimerais remercier, aussi, Mickael Dallaire-Côté, qui était présent au début et qui m'a grandement aidé dans la réalisation des solutions logiciels nécessaire à la réalisation du projet.

J'aimerais finalement remercier mes parents. Sans leurs aides et leurs supports, ainsi que leurs confiances en mes capacités, cette maîtrise n'aurait probablement pas été possible.

Toutes ces personnes ont grandement aidé dans la réalisation de ce projet, par leurs supports, leurs directions et leurs présences.

Je vous dis à tous un immense merci!

Évaluation de l'impact de l'incarnation d'un égo-avatar temps réel sur la marche

Philippe CHARBONNEAU

RÉSUMÉ

Dans les dernières années, la réalité virtuelle (RV) est devenue de plus en plus accessible et de moins en moins dispendieuse. Étant donné cette facilité d'accès, un grand nombre d'études ont continué d'utiliser la RV, qui était déjà disponible auparavant, mais à des coûts beaucoup plus grands. Avec la RV, il est possible de placer un utilisateur dans un environnement virtuel (EV) ainsi que de lui donner un corps virtuel nommé égo-avatar. Cet égo-avatar, lorsque présenté en temps réel, offre un retour visuel montrant ses propres mouvements dans le monde virtuel. Il a été montré que les égo-avatar ont un impact sur le comportement psychologique, tel que d'influencer les patrons de rythme ainsi que la fluidité des mouvements lorsque l'on joue du tambour. Il a également été montré que les égo-avatars peuvent induire une dérive du mouvement lorsque l'égo-avatar est contrôlé pour dévier du mouvement d'un participant. Par exemple, lorsqu'une personne réalise un déplacement de main avec une main virtuelle décalée de la position réelle de sa main, elle utilise la position de la main virtuelle pour réaliser la tâche. Dans le domaine de la réadaptation de la marche, les égo-avatars sont également utilisés. Ces égo-avatars sont généralement utilisés afin de donner un retour visuel au participant marchant dans un EV, ou pour induire un changement moteur. Cependant, aucune étude ne vise à isoler l'impact de ces égo-avatar sur la marche. Il est intéressant alors de se demander quel est l'impact de ces égo-avatars sur la marche. L'objectif de cette étude est d'évaluer et de quantifier l'impact que les égo-avatars peuvent avoir sur la marche en RV, plus précisément quels paramètres spécifiques d'un patron de marche peuvent être changés par la présence de ces égo-avatars. Les participants ont alors été présentés à deux études. La première nommée étude A visait à isoler l'impact qu'un égo-avatar temps réel peut avoir sur la marche. Lors de cette étude, les participants ont eu à marcher dans quatre environnements, réels et virtuels, différents ainsi qu'avec et sans présence d'un égo-avatar temps réel. L'absence d'égo-avatar semble induire un comportement moteur plus confiant, caractérisé par de plus grands pas et une cadence plus élevée dans le monde virtuel. La seconde étude, étude B, vise à évaluer l'impact de deux égo-avatars différents sur le patron de marche en RV. Les participants ont eu à effectuer une tâche motrice, soit de marcher en effectuant une tâche de placement de pied, dans deux conditions différentes, soit avec un égo-avatar à l'apparence humaine et avec un égo-avatar ressemblant à la créature fictive de Godzilla. La différence d'avatar n'induit pas de changement dans le patron moteur des participants, par contre les participants exagèrent significativement leurs mouvements au moment d'exécuter la tâche motrice lorsqu'ils incarnent le personnage de Godzilla. Les participants sous-évaluent également le temps lorsqu'ils incarnent le personnage de Godzilla. Finalement, les résultats qui sont ressortis de cette étude montrent qu'un égo-avatar temps réel n'induit pas de changement dans le

VIII

comportement moteur lors de la marche, mais l'apparence de celui-ci peut influencer le comportement d'un participant lorsqu'il effectue des tâches motrices ciblées.

Mots clés: égo-avatar temps-réel, analyse de la marche, réalité virtuelle, temps

Impact evaluation of the incarnation of real time self-avatar on gait parameters

Philippe CHARBONNEAU

ABSTRACT

In recent years, virtual reality (VR) has become increasingly accessible and less expensive. Given this ease of access, many studies have continued to use VR, which was already available before, but at much higher costs. With VR, it is possible to place a user in a virtual environment (VE) as well as to give him a virtual body known as virtual self-avatar. This self-avatar is best presented in real time and offers a visual feedback showing the own movements of the user in the virtual world. It has been shown that the self-avatars have an impact on psychological behavior, such as influencing rhythm patterns as well as the fluidity of movement when playing drums, but it has also been shown that avatars can induce a drift of movement when it is controlled. For example, a person performing a hand movement with a virtual hand shifted from the actual position of his hand, this person will use the position of the virtual hand to perform the task. In gait rehabilitation, those self-avatars are also used. They are generally used to give a biofeedback to the participant who is walking in the VE, or to influence his gait. However, no study aims to isolate the impact of these self-avatars on gait. It's then interesting to ask what the impact of these self-avatars on gait behavior is. The objective of this study is to evaluate and quantify the impact that self-avatars can have on gait in VR, more precisely what specific parameters of gait pattern can be changed by the presence of these real time virtual self-avatars. For this project, the participants were presented to two studies. The first (study A) was designed to isolate the impact that a real-time virtual self-avatar can have on gait. In this study, the participants had to walk in four different environments, real and virtual, as well as with and without presence of a real-time virtual self-avatar. The absence of self-avatar seems to induce a more confident motor behavior, characterized by greater steps and a higher pace in the virtual world. The second study, Study B, aims to assess the impact of two different self-avatars on gait patterns in VR. Participants had to perform a motor task, either to walk by performing a foot placement task, under two different conditions, with a human-looking self-avatar and with a self-avatar resembling the fictional creature of Godzilla. The difference in self-avatar does not induce a change in the motor pattern of the participants, but the participants significantly exaggerate their movements when performing the foot placement task when they embody the Godzilla character. The participants also underestimate the time when he embodies the Godzilla character. In order to further isolate the impact of the self-avatar in VEs, the system used in this study should be modified to use another medium than the fixed-speed treadmill. Finally, the results that emerge from this study show that a real-time self-avatar does not induce a change in the motor behavior when walking, but the appearance of it can influence the behavior of a participant when performing targeted motor tasks.

Keywords: Real-time self-avatar, gait analysis, virtual reality, time

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Incarnation d'ego-avatar	5
1.2 Effets psychologiques de l'incarnation d'un ego-avatar	7
1.3 Effets d'un ego-avatar en réadaptation	9
1.3.1 Effet sur la motivation et la perception du temps	10
1.3.2 Effet sur le mouvement	11
1.4 Effets d'un ego-avatar sur la réadaptation de la marche	12
1.5 Analyse de la marche	13
1.5.1 Le cycle de marche	14
1.5.2 Mesure de la marche	16
1.5.3 Données cinématiques	17
1.5.4 Données cinétiques	20
1.5.5 Paramètres spatio-temporels	21
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	23
2.1 Définition de la problématique	23
2.2 Objectifs	24
2.3 Hypothèses	24
2.4 Présentation des études	25
CHAPITRE 3 ÉTUDE A : MARCHE VIRTUELLE	27
3.1 Contexte	27
3.2 Objectif	27
3.3 Méthodologie	28
3.3.1 Matériel pour l'acquisition du mouvement	28
3.3.2 Environnements virtuels	32
3.3.3 Protocole expérimental	36
3.3.4 Outils d'analyse	38
3.4 Résultats	41
3.4.1 Description des candidats	41
3.4.2 Cinématique	42
3.4.3 Paramètres spatio-temporels	46
3.4.4 Résultats qualitatifs	49
3.5 Discussion	52

CHAPITRE 4	ÉTUDE B : GAITZILLA	55
4.1	Contexte	55
4.2	Objectif	55
4.3	Méthodologie	56
4.3.1	Matériel pour l'acquisition du mouvement.....	56
4.3.2	Environnements virtuels	57
4.3.3	Animation d'avatar	61
4.3.4	Protocole expérimental	62
4.3.5	Analyse de données.....	65
4.4	Résultats.....	66
4.4.1	Description des participants.....	66
4.4.2	Cinématique	66
4.4.3	Cinétique	70
4.4.4	Paramètres spatiotemporels	70
4.4.5	Données qualitatives	72
4.5	Discussion.....	74
CHAPITRE 5	DISCUSSION GÉNÉRALE	77
CONCLUSION.....		81
ANNEXE I	GAITZILLA : EXPLORING THE EFFECT OF EMBODYING A GIANT MONSTER ON LOWER LIMB KINEMATICS AND TIME PERCEPTION.....	83
ANNEXE II	EVALUATING THE IMPACT OF A VIRTUAL SELF-AVATAR ON SPATIOTEMPORAL GAIT PARAMETERS	111
ANNEXE III	EVALUATION OF THE IMPACT OF A VIRTUAL SELF-AVATAR ON GAIT PARAMETERS	113
ANNEXE IV	QUESTIONNAIRE SUR LES JEUX VIDÉO.....	115
ANNEXE V	QUESTIONNAIRE D'ÉVALUATION DE LA PRÉSENCE	117
ANNEXE VI	QUESTIONNAIRE SUR LES CYBERMALAISES	123
ANNEXE VII	QUESTIONNAIRE SUR L'ÉVALUATION DE L'INCARNATION...125	
ANNEXE VIII	QUESTIONNAIRE D'APPRÉCIATION ET D'ÉVALUATION DU TEMPS.....	127
ANNEXE IX	QUESTIONNAIRE DE RENSEIGNEMENTS PERSONNELS	129

ANNEXE X	DOCUMENT DE PROTOCOLE ET DE CONSENTEMENT ÉTHIQUE	131
BIBLIOGRAPHIE		143

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Paramètres spatio-temporels utilisés pour la mesure de la marche.....22
Tableau 3.1	Détails des paramètres évalués39
Tableau 3.2	Description des données étude A40
Tableau 3.3	Score de présence pour l'étude A51
Tableau 4.1	Évaluation du temps pour l'étude B.....73
Tableau 4.2	Résultats de l'appréciation de l'étude B73
Tableau 4.3	Score de l'incarnation pendant l'étude B.....73
Tableau 4.4	Scores de présence pendant l'étude B.....74
Tableau 4.5	Scores de cybermalaise de l'étude B74

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	« Illusion de la main en caoutchouc ».....6
Figure 1.2	Égo-avatar, perception de l'espace8
Figure 1.3	Différents avatars9
Figure 1.4	Réponse à la question : Quelle session a été la plus longue,11
Figure 1.5	Représentation du cycle de marche,.....15
Figure 1.6	Description des angles de mouvement diagramme.....17
Figure 1.7	Plans de découpe anatomique,18
Figure 1.8	Exemple de données cinématiques pour la hanche, genou et cheville19
Figure 1.9	Exemple de données cinétique illustrant l'évolution des forces de réaction au sol lors de la marche20
Figure 3.1	Positionnement des marqueurs XSens sur les participants29
Figure 3.2	(1) Utilisateur avec capteurs inertiels XSens (2) Utilisateur avec marqueurs inertiels XSens et capteurs passifs Vicon31
Figure 3.3	Capture du mouvement Tracker 3.3.....32
Figure 3.4	Corridor Réel V.S. Corridor Virtuel33
Figure 3.5	Laboratoire réel V.S. virtuel33
Figure 3.6	Environnements virtuels34
Figure 3.7	Égo-avatar humain Étude A.....35
Figure 3.8	Gauche : marche de l'égo-avatar; droite : marche sans égo-avatar.....36
Figure 3.9	Protocol marche virtuelle.....38

Figure 3.10	Moyennes de flexion du genou droit pour toutes conditions (participant 5)	42
Figure 3.11	Moyennes de flexion de la hanche droite pour toutes conditions (participant 5).....	43
Figure 3.12	Moyenne d'amplitudes de flexion/extension du genou droit pour toutes les conditions.....	44
Figure 3.13	Amplitude flexion/extension de la hanche droite pour toutes les conditions.....	45
Figure 3.14	Moyennes de la durée de cycle	46
Figure 3.15	Moyennes de la cadence	47
Figure 3.16	Moyenne de la longueur de pas en mètre.....	48
Figure 3.17	Moyennes de la largeur de pas.....	49
Figure 3.18	Résultats étude A questionnaire d'expérience d'incarnation de l'avatar ...	50
Figure 3.19	Résultats du questionnaire sur les cybermalaises pour l'étude A	51
Figure 4.1	Participante de l'étude B (Gaitzilla)	57
Figure 4.2	Gauche : laboratoire réel; droite : laboratoire virtuel.....	58
Figure 4.3	Environnement de marche (Ville virtuelle)	59
Figure 4.4	Chars d'assaut dans l'étude B (Gaitzilla)	60
Figure 4.5	Schémas de positionnement des corps rigides	64
Figure 4.6	Protocole Gaitzilla	65
Figure 4.7	Moyennes au niveau de la flexion/extension de la hanche lors de l'écrasement des chars d'assaut (en degrés).....	67
Figure 4.8	Moyennes au niveau de la flexion du genou lors de l'écrasement des chars d'assaut (en degrés).....	68
Figure 4.9	Flexion moyenne de la hanche en incarnant un avatar humanoïde et Godzilla (sujet 2).....	69

Figure 4.10	Flexion moyenne du genou en incarnant un avatar humainoïde et Godzilla (sujet 2).....	69
Figure 4.11	Moyenne des forces verticales lors de l'écrasement de chars d'assaut selon l'avatar incarné	70
Figure 4.12	Moyennes de longueur de pas selon la condition d'incarnation	71
Figure 4.13	Moyennes de cadence selon la condition d'incarnation	72

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CS	Contrainte spatiale
CT	Contrainte temporelle
EV	Environnement virtuel
ML	Marche libre
MS	Marche au sol
MTR	Marche sur tapis roulant
MTRV	Marche sur tapis roulant avec retour visuel virtuel
RV	Réalité virtuelle
SOE	Sense of embodiment

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

cm	Centimètre
m	Mètre
ms	Milliseconde
N	Newton
s	Seconde

INTRODUCTION

La marche, chez l'humain, est un domaine de recherche pour lequel un grand nombre d'études est réalisé chaque année. Beaucoup d'études visant la marche visent à évaluer et à améliorer les conditions de vie de personnes souffrant d'un handicap. Ces études évaluent plusieurs facteurs visant à caractériser une marche dite saine ou pathologique. Pour ce faire, les chercheurs dans le domaine de la marche évaluent souvent des personnes dans différents environnements. Les personnes étudiées peuvent, par exemple, être évaluées dans un gymnase, un corridor ou sur un tapis roulant afin d'observer leurs comportements moteurs, qu'ils soient déficients ou sains. Les conditions d'évaluations peuvent parfois être difficiles à reproduire, voire même dangereuses.

Dans les dernières années, avec l'effervescence de la réalité virtuelle (RV), certains groupes de chercheurs ont exploité de nouvelles possibilités pour évaluer le comportement moteur dans ces conditions complexes ou dangereuses, tout en assurant la sécurité des participants et la réplicabilité des conditions d'étude (Pan & Hamilton, 2018).

La RV immersive, qui est caractérisée par l'immersion visuelle complète d'une personne, offre la possibilité de simuler complètement l'environnement immédiat de cette personne, mais aussi sa représentation corporelle, physique. Grâce à cette technologie, le corps d'une personne peut être remplacé par un corps virtuel nommé égo-avatar. Lorsque cet égo-avatar est présenté en temps réel, c'est-à-dire que les événements visuotactiles, caractérisé par la synchronisation de la vision et du sens du toucher et visuomoteurs, caractérisé par la synchronisation d'un mouvement effectué et de la vision, coïncident entre les corps, virtuel et réel, un sentiment d'incarnation, de l'anglais « *sens of embodiment* » (SOE), peut alors être créé (Banakou & Slater, 2014; Kokkinara & Slater, 2014). Au moment où ce sentiment est créé, la personne immergée dans la RV perçoit le corps virtuel de l'égo-avatar comme étant son propre corps (Kiltner, Groten, & Slater, 2012). Des études, menées dans le domaine de la psychologie, ont

montré que le sentiment d'incarnation, lorsque bien exécuté, peut engendrer des changements comportementaux chez une personne, les caractéristiques de l'égo-avatar pouvant être reproduites par l'utilisateur (Rosenberg, Baughman, & Bailenson, 2013).

Des études utilisant l'incarnation qui observent le comportement biomécanique d'une personne ont également été effectuées afin d'influencer ou d'améliorer le comportement moteur. Plusieurs facteurs peuvent influencer la marche lorsque celle-ci est effectuée dans un environnement virtuel (EV). Par exemple, la latence d'un système peut avoir un impact sur la marche d'une personne (Samaraweera, Guo, & Quarles, 2013). Aussi, lorsque comparés à un programme de réadaptation standard, les programmes de réadaptation à la marche utilisant la RV mènent à de meilleurs résultats. L'utilisation d'une rétroaction biologique mène, entre autre, à de meilleurs résultats dans l'amélioration de la longueur du cycle de marche, la durée des phases du cycle de marche et la vitesse lors de la phase d'oscillation (Pavare, Garuta, Ananjeva, & Smolovs, 2015). Dans la majorité des études utilisant la RV pour l'analyse ou la réadaptation de la marche, les égo-avatars sont utilisés. En revanche, l'impact de ces égo-avatars n'est pas isolé ou compris et représente donc une question de recherche importante afin de mieux utiliser ces égo-avatars dans la RV, de mieux comprendre leurs impacts sur le comportement moteur en réadaptation. L'objectif de ce mémoire est d'évaluer l'impact d'égo-avatars en temps réel sur la marche. Afin d'évaluer l'impact des égo-avatars, deux études distinctes seront menées. La première vise à évaluer l'impact de se voir sous forme d'égo-avatar temps réel sur la marche et la seconde vise à évaluer l'impact de différents égo-avatars en apparence, mais également en nature, sur la marche. Afin de quantifier l'impact de ces égo-avatars, les caractéristiques cinématiques, cinétiques, spatiales et temporelles seront évaluées.

Le premier chapitre de ce mémoire porte sur l'état de la littérature en lien avec l'utilisation de la RV dans l'analyse de la marche ainsi que l'analyse de la marche. Le second chapitre présente la problématique, les objectifs ainsi que les hypothèses de l'étude. Le chapitre trois porte sur la méthodologie utilisée dans cette recherche, tel que le protocole d'acquisition ou de

traitement de données. Le chapitre quatre porte sur l'ensemble des résultats de l'étude et finalement, le cinquième chapitre présente les discussions en lien avec les résultats de l'étude réalisée.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Incarnation d'égo-avatar

Le mouvement, chez l'humain, est effectué grâce à un ensemble d'entrées sensorielles variées. Ces entrées sensorielles proviennent de quatre systèmes du corps humain, qui fournissent des informations au système nerveux central, permettant d'effectuer des mouvements tels que la marche. Ces systèmes sont le système proprioceptif, qui permet d'acquérir la position des muscles et des articulations sans avoir à les regarder, le système vestibulaire, qui permet d'obtenir l'information relative au changement d'accélération et gravitationnel du corps, le système visuel, qui acquiert les informations relatives à l'environnement spatial et le système cutané, qui permet d'obtenir des informations relatives aux forces pouvant être appliquées sur le corps pendant un mouvement. L'ensemble de ces systèmes est alors utilisé par le système nerveux central pour optimiser les positions du corps dans des conditions statique ou dynamique (Janin, 2009). Ces systèmes, utilisés afin de contrôler le mouvement, donnent aussi à une personne le sentiment d'être dans son corps. Lorsque ces systèmes sont influencés, il est possible de donner l'impression à une personne qu'elle se trouve dans un corps autre que le sien, ce sentiment est nommé le sentiment d'incarnation. L'incarnation étant la combinaison de trois sentiments : d'auto localisation, de pouvoir et de possession du corps, mais est également amélioré lorsque la présence, une impression subjective qu'une personne face à la réalité d'une expérience virtuelle, est forte (Kiltner, Groten, et al., 2012).

Bien que ces systèmes soient fiables et précis, ils peuvent être influencés afin de modifier ou truquer la perception d'une personne par rapport à son environnement et son propre corps. Des recherches ont évalué l'impact d'une incohérence au niveau du système nerveux central en donnant des stimuli contradictoires entre le système proprioceptif et visuel (E Lateiner & Sainburg, 2003; Imaizumi, Asai, Kanayama, Kawamura, & Koyama, 2014). Il a été montré

que le sens de possession du corps, qui est définie comme l'auto-attribution d'un corps par une personne, peut être influencé afin de truquer une personne à penser qu'un corps ou une partie d'un corps étranger est le sien. L'exemple le plus connu de ce phénomène est l'étude nommée « l'illusion de la main en caoutchouc » (*The rubber hand illusion*) et visait à transférer le sentiment de possession d'un participant de sa main réelle vers une main en caoutchouc. En cachant la main véritable derrière un panneau opaque, les chercheurs arrivent à truquer le système proprioceptif et visuel en effectuant une série de mouvements synchronisés sur la main réelle et fictive (Botvinick & Cohen, 1998). La Figure 1.1 montre l'installation d'un participant lors de cette étude.



Figure 1.1 « Illusion de la main en caoutchouc »
Tirée de Luyat (2014)

De récentes études dans le monde de la psychologie ont montré qu'il est également possible de produire ce phénomène sur un corps artificiel complet ou même de transférer l'appropriation du corps vers le corps d'une autre personne (Petkova & Ehrsson, 2008). Ce phénomène peut également être fait vers un corps virtuel, dans un environnement immersif (Slater, Spanlang,

Sanchez-Vives, & Blanke, 2010). En effet, une personne peut ressentir le sentiment d'incarnation envers un corps virtuel grâce à une synchronisation visuomotrice et visuotactile (Kokkinara & Slater, 2014; Kokkinara, Slater, & Lopez-Moliner, 2015). Maintenant, les égo-avatars sont de plus en plus utilisés dans le monde de la recherche (Fox, R. Christy, & Vang, 2014; Hollman, Brey, Robb, Bang, & Kaufman, 2006; Kokkinara, Kiltner, Blom, & Slater, 2016; Kokkinara & Slater, 2014; Rose, Atree, Brooks, & Johnson, 1998; Siegel, Kelly, & Cherep, 2017; Steinicke & Bruder, 2014). L'utilisation d'égo-avatars permet d'introduire l'incarnation dans les systèmes de RV ce qui devient alors très intéressante dans l'évaluation du comportement humain.

1.2 Effets psychologiques de l'incarnation d'un égo-avatar

La recherche en RV a montré que les personnes tendent à réagir de façon réelle à des événements fictifs se passant dans un monde virtuel immersif. Ces recherches exploitent en partie ce qui a été identifié comme possible dans « l'illusion de la main en caoutchouc ». En effet, l'illusion de la main en caoutchouc a été montrée et étendue au bras en entier en RV (Slater, Perez-Marcos, Ehrsson, & Sanchez-Vives, 2008). Pour comprendre davantage les effets de l'incarnation, soit le sentiment de pouvoir et d'auto localisation du corps, des chercheurs se sont penchés sur les effets comportementaux qu'un avatar complet pouvait avoir sur le comportement d'une personne (Banakou & Slater, 2014; Hasler, Spanlang, & Slater, 2017; Kokkinara & Slater, 2014; Tajadura-Jimenez, Banakou, Bianchi-Berthouze, & Slater, 2017). L'incarnation peut induire des changements de perception de l'espace, mais également induire des changements dans le comportement moteur (Kiltner, Bergstrom, & Slater, 2013a; Tajadura-Jimenez et al., 2017). En effet, de changer l'aspect physique d'un égo-avatar a pour effet de changer la perception des gens par rapport à leur environnement spatial. Une étude visant à évaluer l'impact de l'incarnation de deux égo-avatars différents, soit celui d'un enfant et celui d'un adulte, montre que lorsque les participants incarnent le corps d'un enfant, qui est de la même taille que celui de l'adulte, il identifie leurs environnements comme étant plus

grand et plus imposant, même si aucun changement n'est effectué, mise à part l'apparence de l'égo-avatar (Tajadura-Jimenez et al., 2017) la Figure 1.2 montre les deux égo-avatar utilisés dans cette étude.

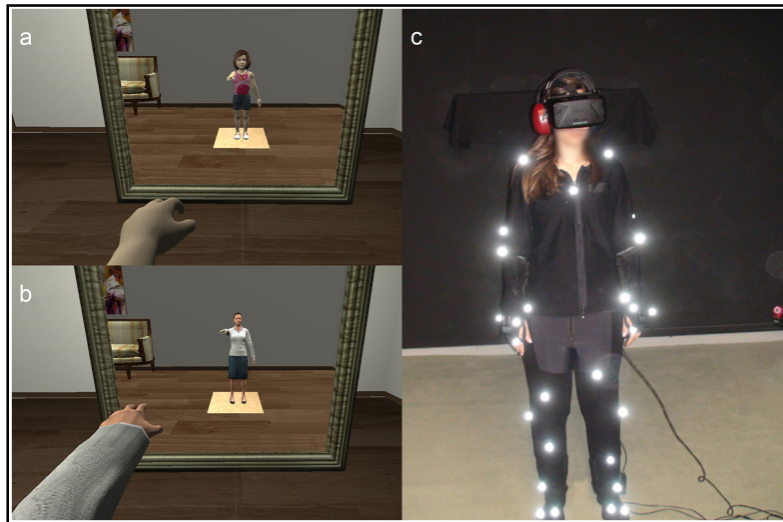


Figure 1.2 Égo-avatar, perception de l'espace
Tirée de Tajadura-Jimenez et al. (2017)

L'utilisation de plusieurs égo-avatar peut également mener à un changement au niveau de la perception des dimensions de son propre corps, par exemple avoir un ventre de plus grande taille qu'en réalité (Normand, Giannopoulos, Spanlang, & Slater, 2011) et même l'illusion d'avoir un bras qui est trois fois plus long que celui réellement utilisé (Kilteni, Normand, Sanchez-Vives, & Slater, 2012). L'utilisation de différent égo-avatar peut également mener à un changement dans le comportement moteur. Par exemple, en donnant la possibilité à des personnes d'incarner plusieurs égo-avatar différents, certains ayant une apparence plus formelle et d'autres ayant une apparence plus décontractée, il a été montré que l'apparence décontractée des égo-avatar mène à un patron de mouvement plus fluide et plus rythmé de la part du participant. La Figure 1.3 montre différents égo-avatar utilisés dans cette étude, A

étant l'absence d'un égo-avatar, C étant un égo-avatar à l'apparence formelle et B étant l'égo-avatar à l'apparence décontractée.



Figure 1.3 Différents avatars
Tirée de Kilteni, Bergstrom & Slater (2013)

Bien que l'étude visant à comparer les mouvements lors d'une activité musicale ne valide pas les mouvements de façon précise, mais plutôt le rythme et l'aisance des participants à effectuer un rythme sur un tambour, cette étude montre qu'un égo-avatar peut avoir un impact sur les mouvements produits par une personne.

1.3 Effets d'un égo-avatar en réadaptation

Puisqu'il a été montré que l'apparence d'un égo-avatar peut avoir un impact sur le mouvement, il est intéressant d'évaluer l'impact que ces égo-avatars peuvent avoir en réadaptation. Un exemple de réadaptation psychologique utilisant l'incarnation est le traitement des phobies

(Botella, Baños, Villa, Perpiñá, & Garcia-Palacios, 2000; Garcia-Palacios, Hoffman, Carlin, Furness, & Botella, 2002; Rothbaum, Hodges, Smith, Lee, & Price, 2000; Wiederhold & Wiederhold, 2005), mais des recherches ont également été effectuées afin d'évaluer l'impact de l'incarnation sur le mouvement et sur la possibilité de son utilité en réadaptation physique.

1.3.1 Effet sur la motivation et la perception du temps

L'utilisation de la RV, plus précisément de l'incarnation, peut servir à améliorer la motivation lors de la pratique de programme de réadaptation, ces programmes pouvant parfois prendre plusieurs années avant d'arriver à un résultat (Kokkinara & Slater, 2014). Lors de ces programmes de réadaptation, les patients peuvent être menés à effectuer des mouvements répétitifs et douloureux afin de récupérer leurs capacités de mouvement. Certains de ces programmes, comprenant une répétition d'un même mouvement ou activités peuvent devenir longs et pénibles pour les patients. Pour améliorer la motivation lors de ces programmes de réadaptation, plusieurs jeux vidéo visant la réadaptation ont été développés afin d'aider à maintenir la motivation et rendre les programmes de réadaptation plus intéressants (Barr, Khaled, Noble, & Biddle, 2006; Baylor, 2009; Betker, Desai, Nett, Kapadia, & Szturm, 2007; H. Sveistrup, 2004). L'utilisation des jeux vidéo dans la réadaptation augmente la motivation et mène même à de meilleurs résultats lors de l'exercice du programme de réadaptation (Betker et al., 2007). En effet, l'utilisation de la RV peut influencer la perception du temps et par le fait même donner l'impression au patient qu'un exercice est plus court et moins monotone. Certaines études ont évalué l'impact sur la perception du temps que la RV peut avoir lors de la pratique d'un entraînement, mais également l'impact de différents égo-avatars (Steinicke & Bruder, 2014). Par exemple, en comparant plusieurs sessions d'entraînement en RV, en étant représenté par plusieurs types d'avatars, soit un enfant, un adulte et un adulte plus âgés, les participants trouvent majoritairement leurs sessions plus courtes lorsqu'ils incarnent un égo-avatar plus jeune. La Figure 1.4 montre le résultat de la question « quelle session était la plus

longue ». Les participants devaient alors comparer la session avec l'égo-avatar adulte avec l'autre égo-avatar, soit enfant ou adulte plus âgé.

	Which session took longer?		
Group	Adult	Other	Total
Child-Adult	9	7	16
Older-Adult	7	9	16
Total	16	16	32

Figure 1.4 Réponse à la question : Quelle session a été la plus longue
Tirée de Steinicke & Bruder (2014)

Aussi, plusieurs facteurs peuvent influencer la perception du temps dans la RV. L'EV ne semble cependant pas influencer la perception du temps. Par contre, le niveau d'excitation ainsi que l'interaction présente dans l'EV peuvent introduire une réduction de la perception du temps lors de la pratique d'activité en RV (Berg, 2017). Les résultats présentés à la Figure 1.4 montrent que la RV peut avoir un impact sur l'estimation du temps et qu'un égo-avatar plus jeune ou plus attirant réduit la durée perçue lors de la pratique d'activité en RV.

1.3.2 Effet sur le mouvement

L'incarnation peut également avoir un effet sur le mouvement en général. Par exemple, il a été montré que la simple position d'un égo-avatar peut induire un inconfort même si les participants sont dans une position confortable et induire un confort lorsqu'ils sont dans une position inconfortable (de la Peña et al., 2010), cette recherche ouvre sur le fait que l'incarnation peut être utilisée afin de réduire la douleur chez une personne. Aussi, l'utilisation d'égo-avatar peut induire un changement involontaire de perception de position d'un participant, nommé dérive proprioceptive (Asai, 2016; E Lateiner & Sainburg, 2003). Il a été

montré que lorsque qu'un participant développe un sentiment d'incarnation envers un corps externe, dans ce cas-ci une main, si cette main virtuelle n'est pas alignée avec la main réelle, le participant utilisera la position de la main virtuelle afin de réaliser une tâche motrice (Imaizumi et al., 2014). Ce phénomène peut également être produit dans l'exécution de tâche motrice afin d'aider des participants à augmenter leurs amplitudes de mouvement lors de récupération d'objet virtuel (Merians, Tunik, & Adamovich, 2009). Ces effets des égo-avatars sur le mouvement sont intéressants, mais l'impact de différents avatars sur le mouvement devrait être exploré afin de mieux comprendre l'effet qu'ils peuvent avoir dans l'exécution d'une tâche motrice plus automatisée chez l'humain.

1.4 Effets d'un égo-avatar sur la réadaptation de la marche

Tel que précédemment mentionné, les égo-avatars sont de plus en plus utilisés dans le monde de la réadaptation, cette section s'attardera cependant à l'utilisation des égo-avatars dans la réadaptation de la marche. Les égo-avatars sont souvent utilisés dans le domaine de la réadaptation de la marche afin d'améliorer ou corriger un problème moteur, tel que l'hémiplégie, l'arthrose, etc. (Lott, Bisson, Lajoie, McComas, & Sveistrup, 2003; McComas & Sveistrup, 2002; Samaraweera et al., 2013; Schulteis & Rizzo, 2001). Les égo-avatars peuvent avoir une influence sur la perception du mouvement effectué lors de la marche dans un EV. En effet, grâce au sens de pouvoir (*agency*), il est possible de créer un sentiment d'incarnation et un sentiment de contrôle des actions même si le participant n'effectue aucun mouvement lorsqu'un égo-avatar, qui marche dans un EV est présenté en perspective de première personne (Kokkinara et al., 2016). Il a également été montré que l'utilisation d'égo-avatars lors de la marche peut induire un changement dans le patron de marche. Une étude visant à évaluer l'impact d'un retour visuel modifier lors de la marche, dans le cas présent le mouvement de la jambe était modifié, a été réalisé. Pour cette étude, les participants se regardaient sous forme d'égo-avatar et devaient marcher dans un EV. L'EV présenté était un environnement statique, reproduisant le laboratoire dans lequel les participants étaient

présents. Les résultats de cette étude montrent que des changements au patron de marche sont possibles lorsqu'un utilisateur est à un retour visuel modifié, mais qu'il existe également une variation dans le patron de marche lorsque l'égo-avatar incarné ne présente pas de retour visuel modifié. Cette étude était réalisée à l'aide d'écran projecteur et n'a pas validé l'impact d'un égo-avatar dans un environnement immersif (Saint-Pierre Côté et al., 2017). Une autre étude visait principalement à identifier l'impact d'une latence qu'un système peut avoir sur la marche, pour réaliser cette étude, les participants étaient présentés dans trois conditions de marche introduisant des latences différentes dans la reproduction de leurs mouvements (Samaraweera et al., 2013). Cette étude est intéressante, car les chercheurs ont comparé des conditions comprenant un égo-avatar et d'autre qui n'en comprenant aucun. Ils ont montré que l'introduction de la marche en RV mène à une réduction des paramètres spatio-temporels de la marche et montre que dans le cas d'une latence élevée, l'absence d'égo-avatar mène à un patron de marche plus sains, soit une plus grande vitesse de marche ainsi qu'une longueur de pas et d'enjambée plus grande. Cependant, les chercheurs mentionnent que les participants ont tous préféré l'exercice lorsque l'égo-avatar était présent. Enfin, plusieurs études utilisent les égo-avatars dans leurs EVs afin d'évaluer ou modifier certains comportements moteurs en réadaptation, mais aucune étude ne s'attarde à l'impact isolé des égo-avatars sur la marche dans les environnements virtuels.

1.5 Analyse de la marche

L'analyse de la marche est un sujet de recherche très étudié dont plusieurs questions restent encore sans réponse. Ce champ de recherche peut sembler simple pour une majorité de personnes, mais plusieurs phénomènes et particularités en font un domaine de recherche vaste et complexe. Les technologies actuellement utilisées pour étudier la marche sont les podomètres, les exosquelettes, les systèmes inertiels, les systèmes magnétiques, les systèmes acoustiques et finalement les systèmes optoélectroniques. Ces systèmes permettent d'obtenir de l'information sur le mouvement de façon précise et fiable et comportent toutes leurs forces

et leurs faiblesses. Ces technologies permettent d'acquérir des données sur le mouvement, spécialement sur la marche, divisée en trois catégories : données cinématiques, identifiant les angles des articulations pendant les mouvements (hanche, genou, cheville, etc.), données cinétiques, identifiant les forces d'actions effectuées pendant un mouvement et finalement les données spatiales temporelles, identifiant les caractéristiques d'un mouvement dans le temps et l'espace. Afin de bien comprendre l'analyse de la marche, les composantes suivantes seront décrites : le cycle de la marche, les données cinématiques, cinétiques et spatio-temporelles.

1.5.1 Le cycle de marche

La marche est un mouvement cyclique, composée d'une succession de pas permettant un déplacement. Ce phénomène peut être observé sans aucun matériel technologique et représente généralement la compréhension globale de la marche chez un grand nombre de personnes. La marche est, cependant, beaucoup plus complexe pour les personnes s'intéressant à la biomécanique de celle-ci. Pour l'analyser, la marche est alors découpée en cycles. Un cycle de marche est identifié par deux événements identiques, mais successifs d'une même jambe, l'attaque du talon (*heel-strike*). Un cycle est identifié comme débutant à l'attaque du talon d'une jambe (droite ou gauche) et se termine par la prochaine attaque du talon effectuée par la même jambe (Viel, 2000).

Avec ces deux événements, un cycle peut être isolé et analysé dans son ensemble. Un cycle peut, par la suite, être découpé en deux phases, phase d'appui (*stance phase*) et phase d'oscillation (*swing phase*). La première phase, celle d'appui, représente moyennement 60% du cycle de marche. Elle commence avec l'attaque du talon et se termine avec le décollement des orteils (*toe-off*), cette phase identifie la période pour laquelle le pied est en contact avec le sol. La deuxième phase, celle d'oscillation, représente généralement 40% du cycle de marche et est identifiée par les mêmes événements que la première phase, mais dans l'ordre inverse (début avec le décollement des orteils et se termine avec l'attaque du talon), elle identifie la période pour laquelle le pied avance dans les airs.

Ces deux phases sont ensuite découpées en quatre phases, deux phases pour la jambe droite et deux phases pour la jambe gauche. Ces deux phases spécifiques sont les phases de double support et de simple support, aussi nommée phase d'envol. La phase de double support est représentée par le contact des deux pieds avec le sol, cette phase représente environ 15% du cycle de marche; c'est cette phase qui différencie, principalement, la marche de la course, la course n'ayant aucune phase de double support. La phase de simple appui est caractérisée par le balancement de la jambe (de l'arrière vers l'avant), elle débute avec un décollement des orteils (*toe-off*) et se termine par une attaque du talon. Cette phase représente, tel que précédemment mentionné, environ 40% du cycle de marche. La Figure 1.5 montre les étapes du cycle de marche.

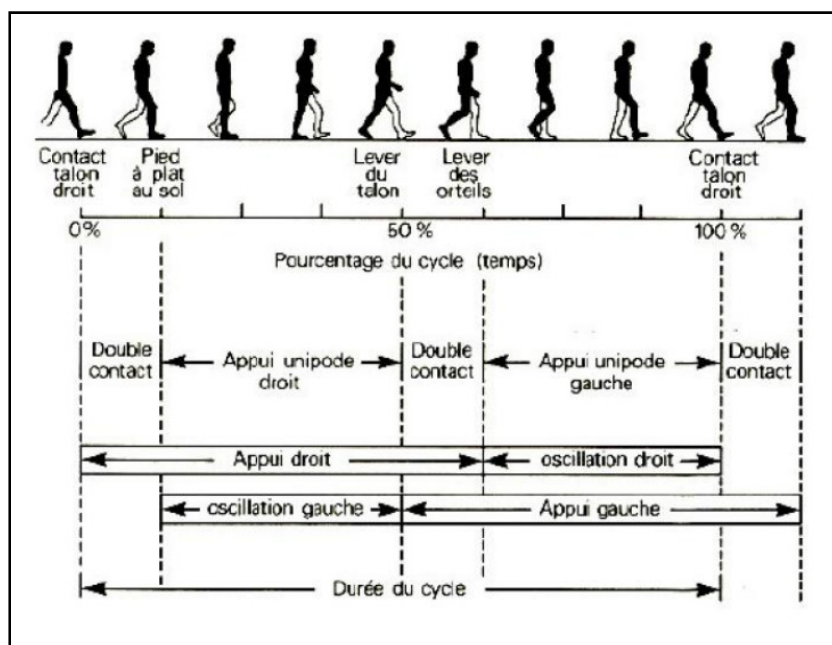


Figure 1.5 Représentation du cycle de marche
Tirée de Viel (2000)

1.5.2 Mesure de la marche

Afin d'évaluer et de comprendre le comportement moteur à la marche d'une personne, plusieurs paramètres peuvent être évalués. Les paramètres évalués peuvent différer d'une étude à l'autre en raison du matériel disponible (i.e. : capteurs inertiels, capteur photoélectrique, etc.) ou du comportement à évaluer (i.e. : spatial, biomécanique, temporel, etc.). Dans le domaine de la biomécanique, deux types de conditions différentes sont utilisées afin d'étudier la marche humaine.

Le premier type de condition est la marche en espace libre (*overground walking*) et est parfois mentionné comme étant la meilleure méthode pour évaluer la marche sans biais (van der Krogt, Sloot, & Harlaar, 2014). En revanche, ce type d'étude requiert plus d'espace. En raison de cet espace plus grand, la majorité des études utilisant la marche en espace libre comme condition préfère l'utilisation de capteurs inertiels, afin de réduire le coût, cependant ces sont moins précis que la majorité des capteurs photoélectriques (Stevens et al., 2014).

Le deuxième type de condition est la marche sur tapis roulant. Cette condition est référée comme étant la plus répandue dans le domaine de l'analyse de la marche (Yang & King, 2016). Cette condition de marche est plus utilisée, car elle permet un espace de capture plus restreint et donc moins coûteux et permet également l'acquisition d'un grand nombre de données sans qu'un participant n'ait à s'arrêter de marcher (van der Krogt, Sloot, & Harlaar, 2014). Par contre, ce type de condition élimine l'aspect variable de la marche.

En effet, des études ont comparé la marche sur tapis roulant ainsi que la marche en espace libre. Par exemple, (Yang & A. King, 2015), ont identifié certaines différences entre les deux conditions au niveau des paramètres spatiotemporels. Ces différences étaient caractérisées par des pas plus courts sur tapis roulant $0.430 \pm 0.037\text{m}$ en espace libre et $0.365 \pm 0.041\text{m}$ sur tapis roulant) ainsi qu'une vitesse de marche plus lente lorsque les participants devaient marcher sur un tapis roulant ($1.148 \pm 0.152\text{ m/s}$), comparativement à la marche en espace libre (1.411 ± 0.199

m/s). Pour définir la vitesse de marche des participants, ceux-ci devaient tout d'abord marcher dans un espace libre puis sur un tapis roulant. Pour la marche sur tapis roulant, les participants devaient identifier leur vitesse de marche confortable, ensuite la vitesse était modifiée pour aller à 80%,90%,100%,110% et 120% de la vitesse originale, puis la vitesse de marche confortable était décidée par le participant. Afin d'en arriver à cette conclusion, les auteurs ont fait marcher 54 participants.

1.5.3 Données cinématiques

Les données cinématiques sont les données permettant d'analyser les mouvements d'une personne en observant les angles effectués par ses articulations. Pour l'analyse de la marche, les angles présents dans les membres inférieurs sont les plus analysés (bassin, hanches, genoux, chevilles). Ces angles sont présents pour trois caractéristiques : flexion/extension, abduction/adduction et rotation. La Figure 1.6 montre ces trois caractéristiques.

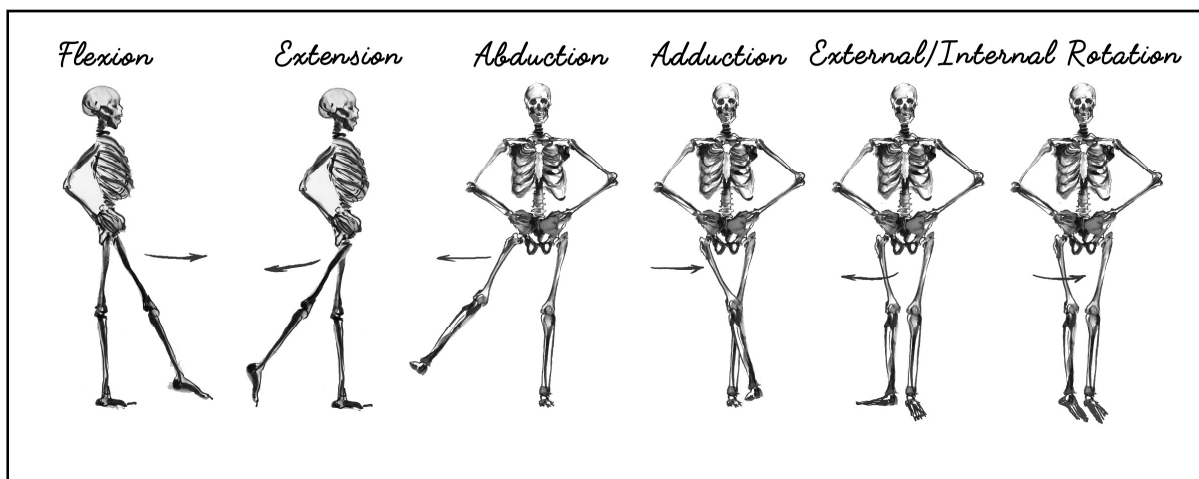


Figure 1.6 Description des angles de mouvement diagramme
Tirée de Neill (2018)

Les données cinématiques peuvent être analysées dans trois plans distincts soit le plan frontal, le plan sagittal et le plan transversal. Ces trois plans aident à identifier l'orientation des angles

précédemment mentionnés. La Figure 1.7 montre l'ensemble des plans ainsi que la coupe corporelle qu'ils représentent.

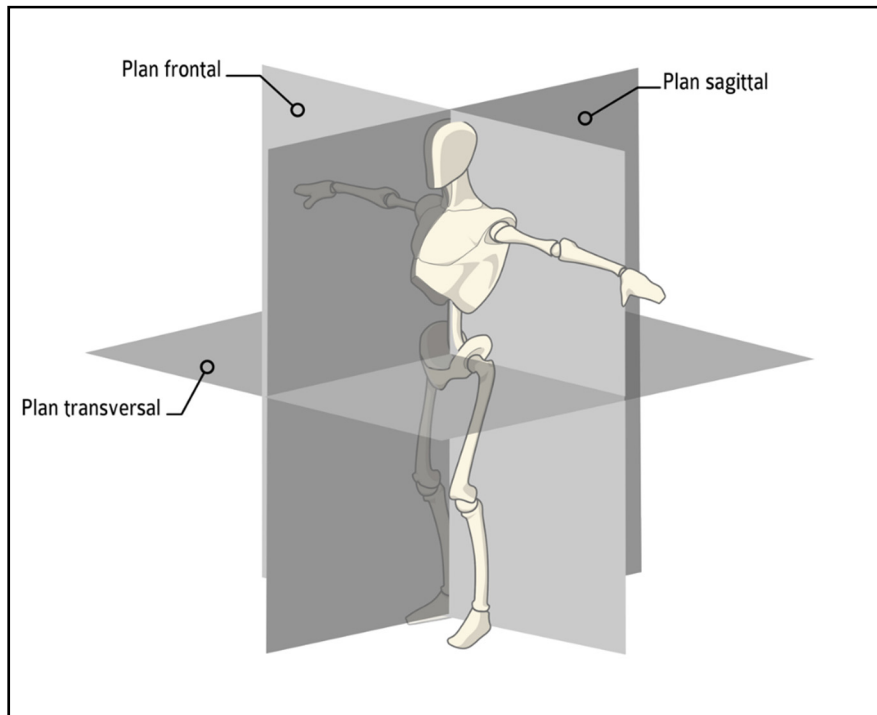


Figure 1.7 Plans de découpe anatomique
Tirée de Manolova (2012)

Lorsque les angles représentant les données cinématiques sont visualisés, ils le sont habituellement sous forme de courbes représentées en degrés. La Figure 1.8 montre un exemple de résultat cinématique.

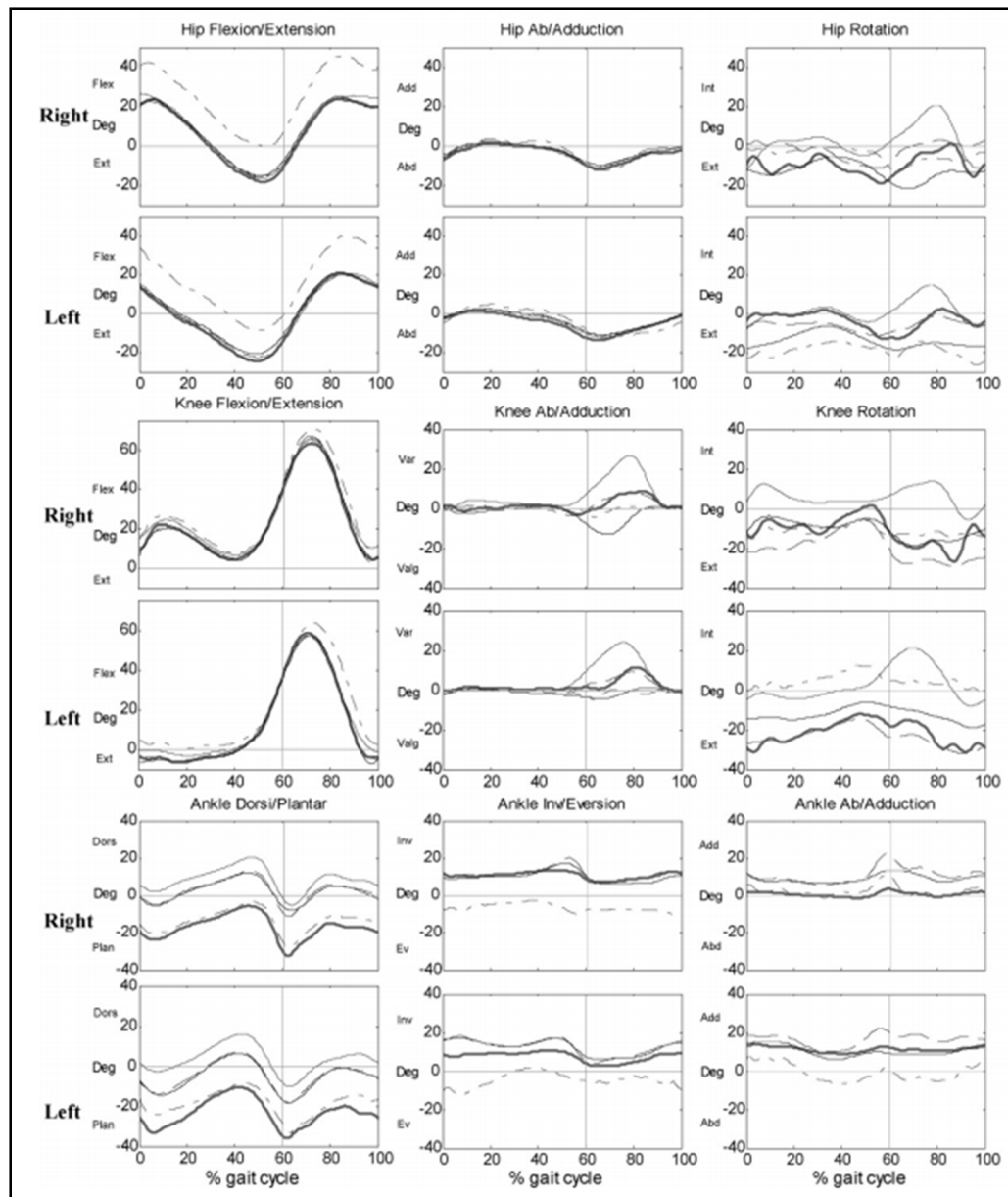


Figure 1.8 Exemple de données cinématiques pour la hanche,
genou et cheville
Tirée de Ferrari et al. (2008)

1.5.4 Données cinétiques

Les données cinétiques représentent les forces d'action effectuées pendant un mouvement. Les forces qui sont souvent utilisées dans le domaine de l'analyse de la marche sont celles représentant la réaction au sol lors de l'exécution des pas. Ces forces peuvent permettre d'analyser un effort, un mouvement et peuvent également permettre la reconstruction inverse d'un mouvement à l'aide de la dynamique inverse. Les données cinétiques sont souvent présentées sous forme de courbes identifiées par des Newton (N). La Figure 1.9 montre une courbe classique de force lors d'un cycle de marche.

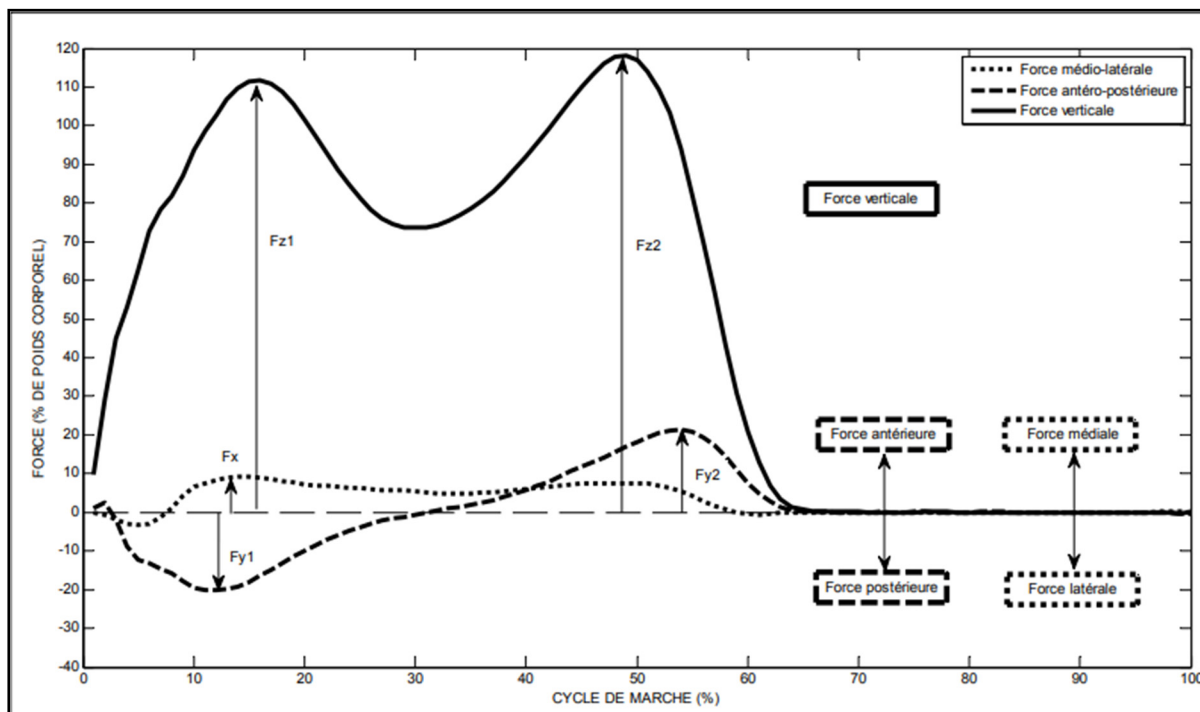


Figure 1.9 Exemple de données cinétique illustrant l'évolution des forces de réaction au sol lors de la marche

Tirée de Gourdou (2010)

1.5.5 Paramètres spatio-temporels

À l'aide des données cinématiques et cinétiques, certains paramètres peuvent être calculés. Un groupe de paramètres pouvant être calculés sont les paramètres spatio-temporels. Ces paramètres permettent d'identifier certains comportements moteurs dans l'espace et le temps et sont largement utilisés dans la recherche en mécanique et spécialement en biomécanique. Le tableau 1 énumère certains paramètres plus souvent utilisés dans la littérature ainsi que leurs descriptions.

Tableau 1.1 Paramètres spatio-temporels utilisés pour la mesure de la marche

Nom	Définition
Longueur de pas	Distance (m) effectuée vers l'avant du pied en envol par rapport au pied en appui.
Longueur de foulée	Corresponds à la distance (m) effectuée par deux pas
Longueur du cycle	Corresponds à la distance (m) parcourue dans un cycle complet de marche.
Durée de cycle	Temps (s) pour la réalisation complète d'un cycle de marche
Cadence	Corresponds au nombre de pas par minute (pas/min)
Temps d'appui	Temps (s) identifiant la pause au sol des pieds
Temps d'envol	Temps (s) identifiant l'envol du pied (décollé du sol)
Largeur de pas	Distance (m) entre le centre du talon droit et le centre du talon gauche lors d'un pas
Vitesse de marche	Vitesse (m/s) à laquelle la marche est réalisée

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

2.1 Définition de la problématique

Un nombre grandissant d'études font une utilisation des égo-avatars pour des participants qui marchent dans un environnement virtuel. Or, la marche est contrôlée par plusieurs facteurs cognitifs et sensoriels. Les entrées sont analysées et traitées, provoquant une réaction dans les muscles devant agir afin de produire une marche appropriée. Plusieurs facteurs peuvent influencer la marche, mais trois principaux peuvent être identifiés : le retour visuel associé à l'environnement, le système vestibulaire et la proprioception, définissant la conscience de la position des différentes parties du corps (Powell, 2011). Étant donné l'importance de l'ensemble de ces facteurs lors de la marche, il est possible d'envisager que le remplacement du retour visuel associé à ses propres mouvements par un retour virtuel puisse engendrer des changements dans la marche des utilisateurs.

Lors de l'utilisation d'un égo-avatar, il est habituel de substituer le corps de l'utilisateur par celui d'un personnage humanoïde aux proportions semblables à celles de son corps. Par contre, certaines études utilisent des avatars plus ludiques, aux proportions altérées. De tels avatars peuvent être utilisés pour rendre l'expérience plus divertissante, par exemple. Les études du domaine de la psychologie rapportées dans la section précédente montrent que les égo-avatars ont un effet sur le comportement psychologique d'une personne et que dans plusieurs scénarios, les utilisateurs adoptent un comportement associé à celui de leur personnage virtuel. La nature de l'ego-avatar est donc un autre facteur qui pourrait influencer le mouvement d'un utilisateur et dont l'effet devrait être évalué.

À ce jour, l'effet de remplacer le corps de l'utilisateur qui marche dans un EV par celui d'un égo-avatar, humanoïde ou ludique, n'a jamais été isolé et n'est donc pas connu.

2.2 Objectifs

L'objectif de cette recherche est d'identifier et de quantifier l'influence qu'un égo-avatar temps réel présenté à l'aide d'un visiocasque dans un EV immersif peut avoir sur le comportement moteur, spécifiquement à la marche. Les sous-objectifs sont les suivants :

- quantifier l'impact d'un égo-avatar temps réel sur la marche en comparant le comportement moteur d'un participant lorsqu'il marche avec et sans égo-avatar (étude A);
- quantifier l'impact de différents égo-avatars sur la marche en exposant un participant à deux conditions de marche identiques, mais représentées par deux égo-avatars différents (étude B).

2.3 Hypothèses

Les hypothèses principales sont les suivantes :

- le flux optique dynamique répliquant le flux optique d'un corridor réel, combiné à la présence de l'égo-avatar temps réel aideront les participants à adopter une marche sur tapis roulant plus près d'une marche en corridor physique, dans l'EV;
- puisque la nature d'un égo-avatar peut influencer le comportement d'un utilisateur, la nature de l'avatar modifiera la marche des participants. Lorsqu'ils incarneront un avatar de monstre (Godzilla), ils adopteront une marche plus ample, caractérisée par des pas plus larges et une force de réaction au sol plus grande, comparativement à l'incarnation d'un égo-avatar humanoïde.

2.4 Présentation des études

Afin de répondre aux différents objectifs, deux études distinctes ont été réalisées. La première, nommée étude Marche virtuelle (étude A), vise à isoler l'impact de l'égo-avatar temps réel sur la marche et est présentée dans son ensemble au chapitre 3. La deuxième, nommée Gaitzilla, (étude B) vise à comparer l'es impacts de différent égo-avatar temps réel sur la marche et est présentée au chapitre 4.

CHAPITRE 3

ÉTUDE A : MARCHE VIRTUELLE

3.1 Contexte

L'étude présentée dans ce chapitre vise à évaluer la question de recherche suivante : Est-ce que la présence d'un égo-avatar temps réel, présenté à l'aide de la réalité virtuelle immersive, a un impact sur la marche dans les environnements virtuels.

Pour réaliser cette étude, l'outil d'animation d'égo-avatar développé au laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie (LIO) a été utilisé (Dallaire-Côté, Charbonneau, Saint-Pierre Côté, Aissaoui, & Labbe, 2016; Saint-Pierre Côté, 2017). Cet outil permet d'animer, en temps réel, un personnage virtuel à l'aide des mouvements d'une personne. Des modifications ainsi que des ajouts, tels que l'ajout d'un système de capture de mouvement supplémentaire (XSens) ainsi que l'ajout d'EV, ont été apportés à ce logiciel afin que celui-ci soit en mesure de répondre aux exigences de la présente étude devant être réalisée. Les paramètres cinématiques, spatiotemporels et cinétiques des membres inférieurs ont été utilisés afin d'évaluer l'impact de l'égo-avatar sur les participants. Afin de bien isoler l'égo-avatar dans ce projet, ainsi que de comparer son impact entre un corridor physique et un corridor virtuel, les participants ont été présentés à plusieurs conditions, réelles ou virtuelles. Les participants ont eu à marcher dans des conditions de corridor réel, de tapis roulant et de tapis roulant présentant un corridor virtuel avec ou sans égo-avatar, permettant l'isolement de l'avatar lors de l'analyse.

3.2 Objectif

L'objectif de cette recherche est d'identifier et de quantifier l'influence qu'un égo-avatar temps réel présenté à l'aide d'un visiocasque dans un EV immersif peut avoir sur les patrons de marche sur tapis roulant.

3.3 Méthodologie

Afin de réaliser l'ensemble des acquisitions pour cette étude, des systèmes de capture du mouvement et d'animation 3D ont été utilisés. La section suivante détaille les systèmes utilisés afin d'acquérir l'ensemble des données utiles à l'étude.

3.3.1 Matériel pour l'acquisition du mouvement

Système utilisé pour acquisition en corridor

Afin d'obtenir les données cinématiques et spatiotemporelles de la marche dans le corridor, un système inertiel XSens a été utilisé. L'utilisation de ce système est préférable lorsqu'un grand volume d'acquisition est demandé, car il permet l'acquisition du mouvement sans caméra et permettait donc au participant de circuler dans le corridor de marche sans restriction. Afin de mesurer les mouvements des membres inférieurs, les participants étaient équipés de sept capteurs dans les positions suivantes : pied droit, pied gauche, tibia droit, tibia gauche, fémur droit, fémur gauche et bassin. La Figure 3.1 montre l'emplacement des capteurs sur le corps d'un participant.

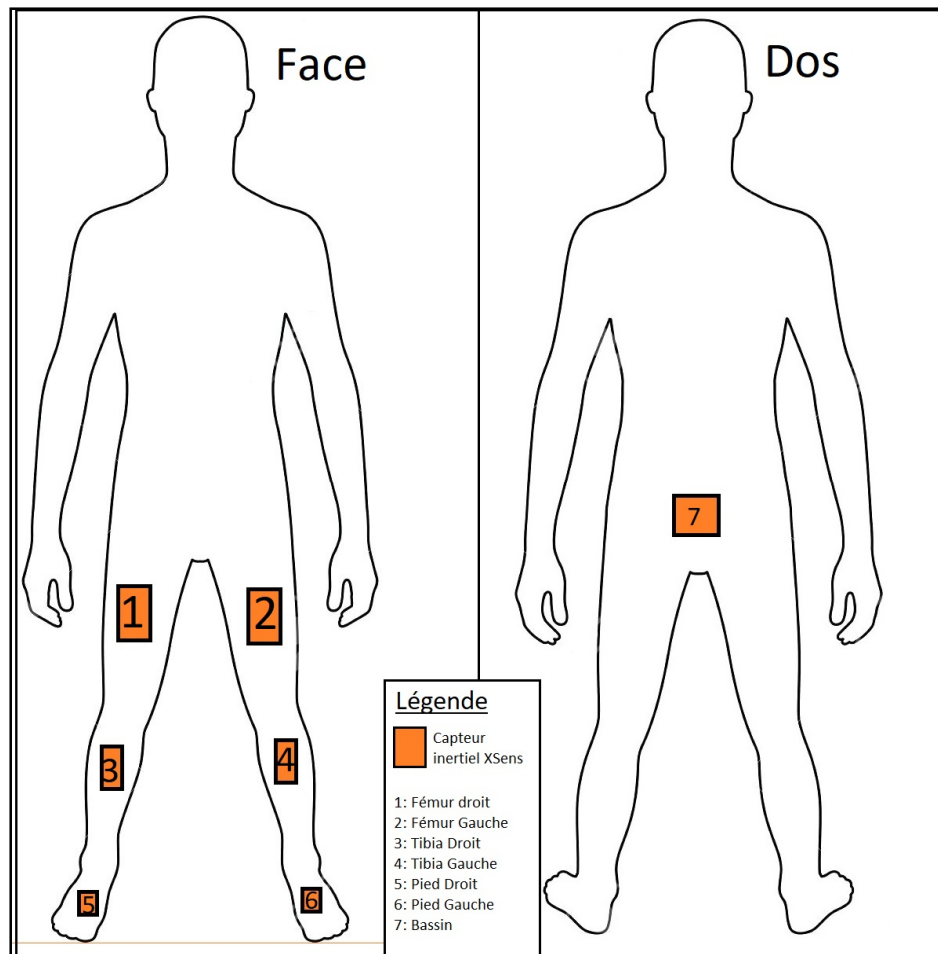


Figure 3.1 Positionnement des marqueurs XSens sur les participants

Lorsque les capteurs sont bien fixés aux participants, la calibration XSens de type N-Pose pouvait être effectuée. Pour réaliser cette calibration, les mesures suivantes devaient être prise en centimètres sur le participant : taille, longueur du pied, portée des bras, hauteur des chevilles par rapport au sol, hauteur des hanches par rapport au sol, largeur des hanches, hauteur du genou par rapport au sol, largeur des épaules, hauteur des épaules par rapport au sol, épaisseur des semelles de soulier. Cette méthode en est une connu et montre une répétabilité forte pour des mesures de marche avec un ICC $> 0,6$ et un déviation standard de moins de 5° (Al-Amri et al., 2018; Filippeschi et al., 2017).

Système utilisé pour acquisition sur tapis roulant

Afin de bien capter le mouvement de la marche effectuée sur le tapis roulant, une combinaison des systèmes XSens, Vicon et du système d'*Advance Mechanical Technology inc.* (AMTI) a été utilisée. Le système XSens était conservé (sans acquisition de données) afin de pouvoir comparer les conditions de marche sur tapis roulant avec la condition de marche en corridor. Pour la capture du mouvement, un système Vicon composé de 12 caméras (Vicon T20-S) a été utilisé puisqu'il permet une plus grande précision que le système Xsens pour l'animation de l'égo-avatar ainsi que pour acquérir les données cinématiques dans les différentes conditions. Seize (16) corps rigides composés de trois ou quatre marqueurs passifs ont été fixés sur les participants. Les marqueurs Vicon servaient à mesurer la marche étaient positionnés par-dessus les capteurs XSens précédemment placés sur le participant ainsi que sur les segments du haut du corps. Les corps rigides supplémentaires positionnés sur le haut du corps étaient présents afin de capter les mouvements des bras, de la tête et du dos du participant pour animer l'égo-avatar. Les corps rigides étaient situés sur les segments suivants : main gauche, main droite, avant-bras gauche, avant-bras droit, bras gauche, bras droit, tête (marqueurs positionnés sur le visiocasque), haut du dos (marqueurs positionnés entre les omoplates) et bas du dos situé au niveau des vertèbres lombaires supérieures (L1 ou L2). Le système AMTI, composé du tapis roulant capable de capter les forces de réaction au sol, était utilisé afin de mesurer les paramètres cinétiques de la marche. La Figure 3.2 présente un participant portant l'ensemble des capteurs (XSens et Vicon). Le logiciel de capture de mouvement Vicon Tracker 3.3 était utilisé afin d'enregistrer et de transférer les données du mouvement. La Figure 3.3 montre le résultat d'une capture de mouvement d'un participant avec le logiciel Tracker 3.3.



Figure 3.2 (1) Utilisateur avec capteurs inertiels XSens (2) Utilisateur avec marqueurs inertiels XSens et capteurs passifs Vicon

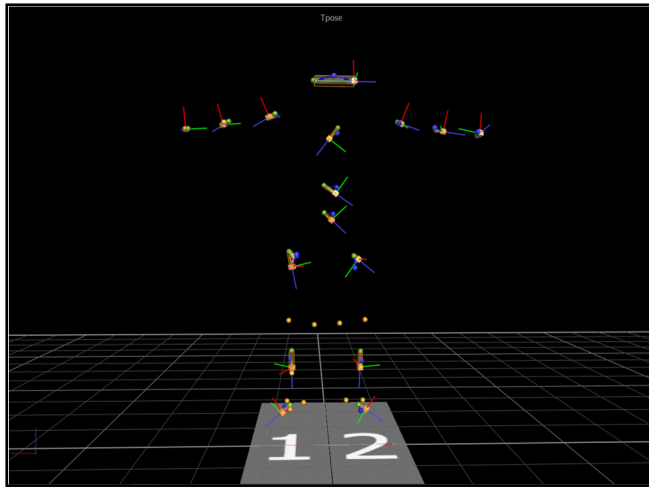


Figure 3.3 Capture du mouvement Tracker 3.3

3.3.2 Environnements virtuels

Afin d'animer l'égo-avatar temps réel, la combinaison des logiciels Vicon Tracker 3.3 et Unity3D 5.6 a été utilisée. Le logiciel Vicon Tracker 3.3 a été utilisé pour l'acquisition du mouvement en temps réel et Unity3D 5.6 servant à l'animation graphique du personnage et de l'environnement. Afin d'animer l'égo-avatar, la méthode d'animation développée par Sara Saint-Pierre Côté (Saint-Pierre Côté, 2017) a été utilisée, l'ajout du visiocasque de réalité virtuelle Oculus Rift CV1 a été effectué au système afin de permettre la visualisation de l'égo-avatar avec une perspective première personne de façon immersive. Pour évaluer l'impact de l'égo-avatar seulement, plusieurs environnements virtuels ont été développés. Premièrement, l'environnement reproduisant le laboratoire d'acquisition du mouvement du LIO-CRCHUM a été conservé. Par la suite, un EV étant une reproduction du corridor physique du 7^e étage du CRCHUM a été effectué. Pour réaliser cet environnement, le corridor physique a été mesuré afin que les distances et l'espace au sein de l'EV soient exactement les mêmes que dans le corridor physique. La Figure 3.4 montre le corridor réel ainsi que sa reproduction en trois dimensions. La Figure 3.5 montre le laboratoire réel ainsi que sa reproduction en trois dimensions.



Figure 3.4 Corridor Réel V.S. Corridor Virtuel

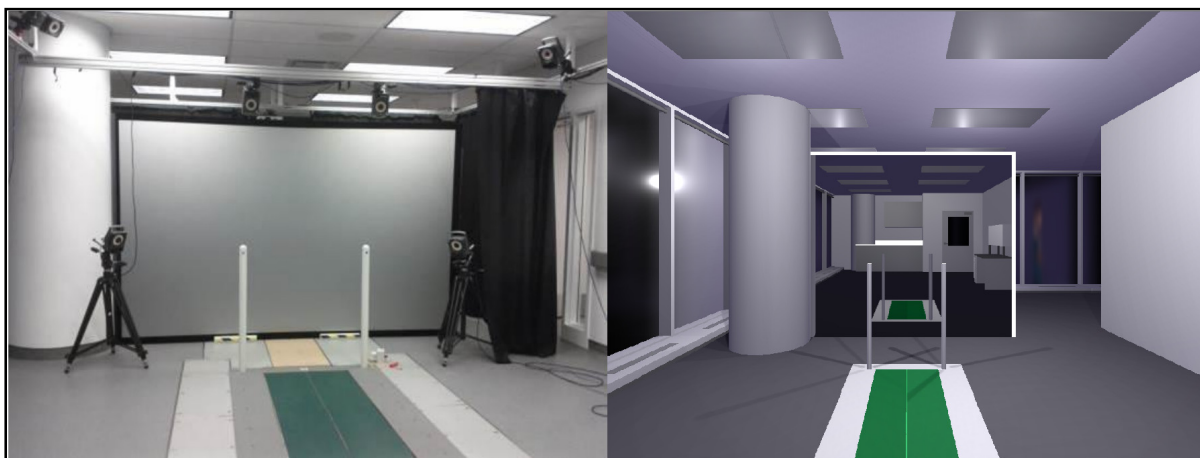


Figure 3.5 Laboratoire réel V.S. virtuel

Comme le corridor physique n'est que 50 m de long et que les acquisitions de marche sur tapis roulant doivent durer au moins deux minutes, le corridor virtuel est reproduit lorsque le participant avance dans l'EV sur le tapis roulant, donnant l'impression d'un corridor de marche infinie. La Figure 3.6 montre les différents environnements virtuels utilisés. La vitesse de défilement de l'EV était synchronisée avec la vitesse de marche établie sur le tapis roulant; par exemple, si le tapis roulant défilait à une vitesse de 1.1 m/s, l'EV défilait à une vitesse de 1.1 m/s. Pour représenter les mouvements du participant dans l'EV, un modèle provenant de la plateforme Mixamo d'Adobe a été utilisé. Ce modèle était le même pour tous les participants,

homme et femme, et reproduisait les mouvements des participants en temps réel. La Figure 3.7 montre le modèle d'avatar utilisé dans cette étude.



Figure 3.6 Environnements virtuels

Lors de la marche en corridor virtuel, afin de bien isoler l'impact de l'égo-avatar, les participants devaient marcher avec un égo-avatar temps réel et sans égo-avatar temps réel. Lorsque l'égo avatar était absent, des cylindres étaient utilisées afin de représenter la position des pieds sur le sol. La Figure 3.6 montre l'égo-avatar dans les environnements virtuels du laboratoire et du corridor. Pour réduire le plus possible le risque de chute, un rectangle blanc était présent sur le sol virtuel. Ce rectangle blanc représentait les limites physiques du tapis roulant sur lequel les participants marchaient dans le monde physique lorsqu'ils se déplaçaient dans l'EV. La Figure 3.8 montre les différents retours bio visuels présentés aux participants.

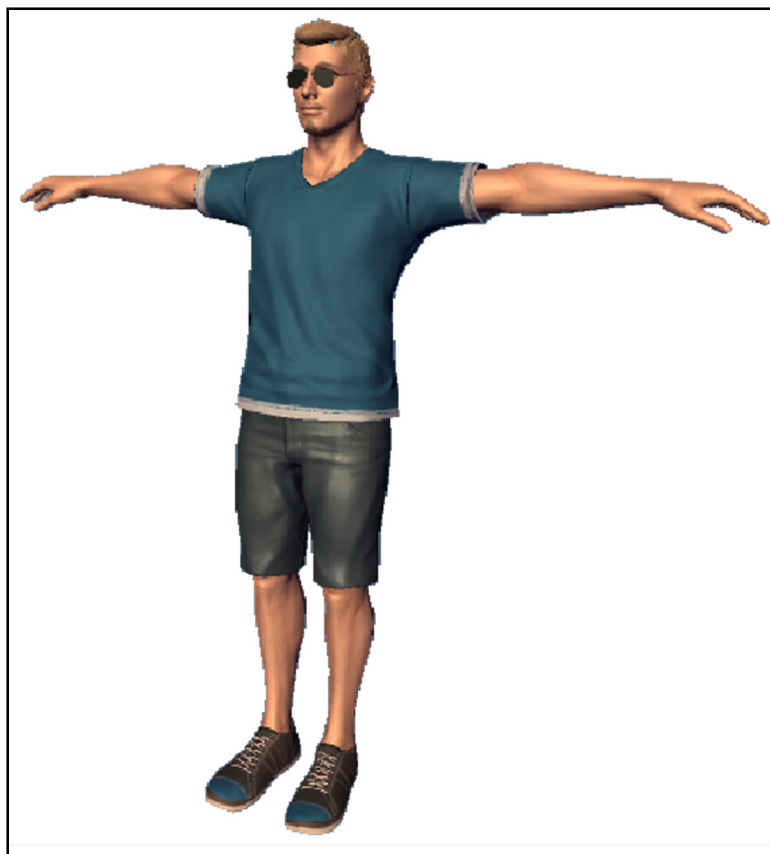


Figure 3.7 Égo-avatar humain Étude A

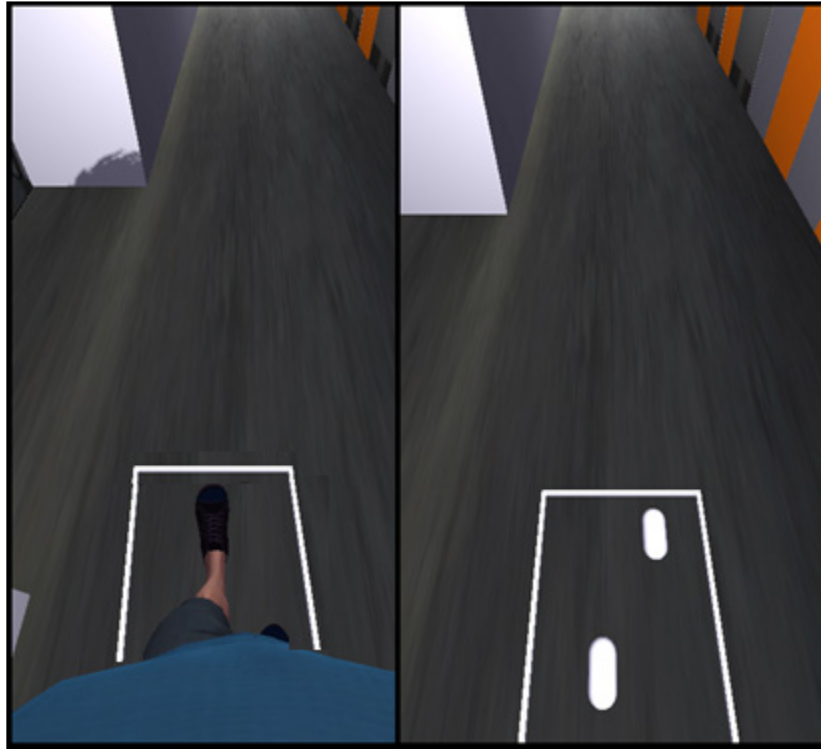


Figure 3.8 Gauche : marche de l'égo-avatar;
droite : marche sans égo-avatar

3.3.3 Protocole expérimental

Le protocole expérimental utilisé pour cette étude comportait 7 étapes distinctes. Tout d'abord, avant l'arrivée des participants, le système Vicon Tracker devait être calibré en suivant la méthode de calibrage par balayage conseillée par Vicon. Le système Xsens devait également être prêt et chargé afin de permettre l'acquisition complète des données de marche. Ensuite, les participants devaient lire, accepter et signer les documents d'éthique : formulaire d'information et de consentement, protocole détaillé. Ensuite, les participants devaient remplir les formulaires d'information générale permettant d'enregistrer leurs poids, taille, âge, sexe, etc., et le questionnaire d'information en lien avec leurs habitudes de jeux vidéo (voir annexe

IV et IX). Par la suite, le système XSens était fixé aux participants, puis calibré tel que décrit à la section 3.3.1.

Les participants commençaient alors les phases de marche de l'étude. Ils devaient réaliser les cinq conditions de marche distinctes : marche en corridor naturel; marche sur tapis roulant sans RV, marche sur tapis roulant avec RV et laboratoire virtuel; marche sur tapis roulant avec RV en corridor virtuel avec et sans égo-avatar. Pour effectuer la première phase de marche, les participants devaient se positionner sur le centre du tapis roulant AMTI, face à la sortie du laboratoire et devaient commencer leur marche sur le long du corridor naturel, jusqu'au bout de celui-ci. Lors de la marche en corridor, une personne était chargée de les suivre avec l'ordinateur portable d'acquisition afin d'assurer la bonne capture des données. Cette étape était réalisée quatre fois de suite. Après avoir réalisé la marche en corridor naturel, les participants étaient équipés de marqueurs passifs permettant l'acquisition du mouvement à l'aide du système Vicon, tel qu'indiqué à la section 3.3.1. La deuxième période d'acquisition nécessitait que les participants marchent sur le tapis roulant AMTI et permettait d'obtenir leur vitesse de marche confortable ainsi que leur patron de marche de base sur tapis roulant. Cette période durait huit minutes et une minute d'enregistrement de données était effectuée à la fin de cette période de marche. Les participants étaient ensuite équipés du visiocasque de réalité virtuelle afin d'effectuer l'acquisition du patron de marche en RV. Leur égo-avatar était premièrement calibré suivant la méthode développée par Saint-Pierre Côté (Saint-Pierre Côté, 2017) suivi d'une période d'environ trois minutes permettant de renforcer leur sentiment d'incarnation par rapport à l'égo-avatar. Afin de permettre une bonne transition entre la marche physique et la marche en RV, le premier EV présenté au participant était l'environnement reproduisant le laboratoire d'acquisition du mouvement du LIO-CRCHUM, tel qu'illustré à la Figure 3.7. Les participants devaient marcher dans cet environnement pendant cinq minutes et la dernière minute de l'essai était enregistrée pour l'acquisition de données. Ensuite, les participants devaient aléatoirement réaliser les deux conditions en corridor virtuel, soit la marche sans égo-avatar et la marche avec égo-avatar. Pour ces deux conditions, les participants

devaient marcher pendant cinq minutes et la dernière minute de marche était enregistrée pour l'acquisition des données. Entre chaque condition de RV, les participants devaient répondre à trois questionnaires : questionnaire d'évaluation de la présence, questionnaire d'évaluation du cybermalaise et questionnaire d'évaluation du niveau d'incarnation (voir annexe V, VI, VII et VIII). À la suite de l'enregistrement des cinq conditions de marche, l'ensemble des capteurs servant à l'enregistrement du mouvement étaient retirés des participants. Finalement, les participants devaient remplir et signer le formulaire de compensation financière et recevaient la compensation prévue par le comité éthique du CRCHUM et de L'ÉTS, soit 15\$. La Figure 3.9 montre le protocole sous forme graphique.

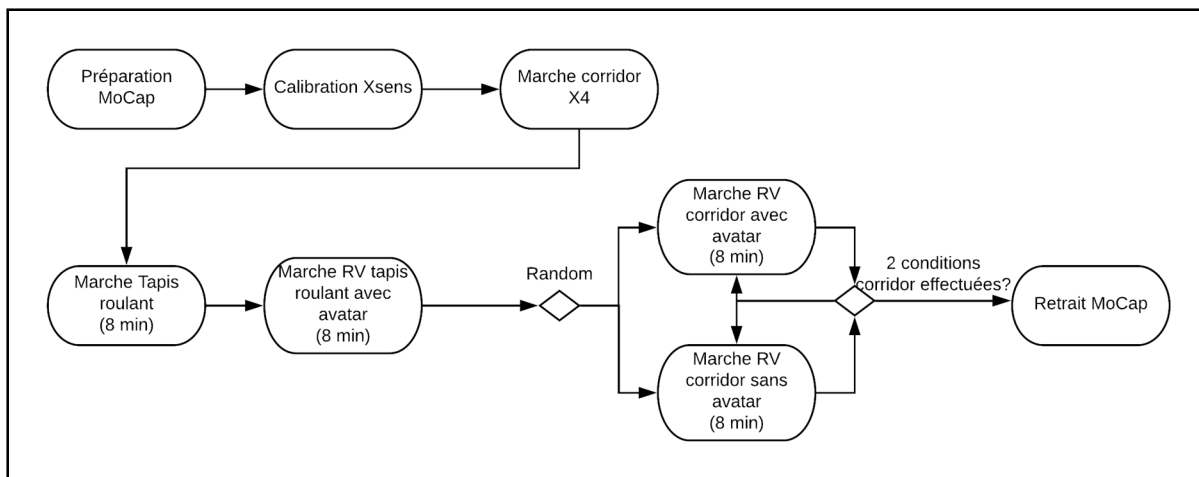


Figure 3.9 Protocol marche virtuelle

3.3.4 Outils d'analyse

À la suite de l'acquisition de données, les paramètres cinématiques, cinétiques et spatio-temporels étaient calculés. Le tableau 3.1 énumère les paramètres calculés.

Tableau 3.1 Détails des paramètres évalués

Paramètres	Détails
Cinématiques	<ul style="list-style-type: none"> • flexion/extension aux hanches • flexion/extension aux genoux • amplitude de mouvement à la hanche et au genou (valeurs maximum – valeurs minimum)
Cinétiques	<ul style="list-style-type: none"> • forces de réactions au sol
Spatio-temporels	<ul style="list-style-type: none"> • longueur de pas • largeur de pas • cadence

Tout d’abord, les fichiers de données produites par Tracker 3.3 étaient convertis au format *comma separated value* (csv) donnant les positions et quaternions de chaque corps rigide pendant l’enregistrement. Lorsque des données brisées étaient présentes, les fichiers Tracker 3.3 (.x2d,.xcp) étaient transférés dans Vicon Nexus 2.2 pour permettre le ré-étiquetage (*relabeling*) et de combler les lacunes d’enregistrement (*gap-filling*). Les données brutes étaient ensuite passées dans le logiciel de calcul Matlab et étaient découpées comme suit : les données étaient analysées afin d’identifier l’extension maximale de la hanche pour chaque jambe afin d’identifier les différents cycles de marche présents dans l’enregistrement. Pour chaque maximum trouvé, le minimum suivant était sélectionné afin d’identifier la fin du cycle de marche. Pour chaque lot de données situées entre deux maximum, le premier tiers des données était observé afin d’identifier l’attaque du talon, en cherchant le maximum du double dérivé. Le découpage est ensuite effectué d’un maximum vers un autre, les cycles de marche étant identifiés par deux attaques du talon du même pied. Pour extraire les données spatiales temporelles, la méthode de découpage selon la vitesse angulaire des articulations était utilisée (Burnfield, 2010; Sutherland, Olshen, Cooper, & Woo, 1980; Taborri, Palermo, Rossi, & Cappa, 2016). Pour les données provenant du système XSens, elles reposent sur le découpage

du cycle avec les événements de décollement des orteils et d'attaque du talon étant donnée l'absence de forces. Les données étaient calculées comme indiqué au tableau 3.2.

Tableau 3.2 Description des données étude A

Type de données	Description
Spatiales	
Longueur de pas	Distance entre les orteils et le talon + la longueur du pied au moment de l'attaque du talon
Longueur de foulée	Longueur de pas gauche + longueur de pas droite
Vitesse de marche	Longueur de foulée / Durée de cycle
Largeur de pas	Définition de la direction avant, afin de définir une droite d'action. Distance entre le talon droit et la droite d'action + distance entre le talon gauche et la droite d'action
Temporelles	
Durée d'appui	Temps écoulé entre le décollement des orteils et l'attaque du talon
Durée d'envol	Temps écoulé entre l'attaque du talon et le décollement des orteils
Durée de double support	Temps écoulé entre l'attaque du talon droit et le décollement des orteils gauche

À la suite du traitement des données, des tests statistiques ont été exécutés à l'aide du logiciel StatGraphics Centurion XVII. Dans un premier temps, le test de normalité Shapiro-Wilk était réalisé sur l'ensemble des données, afin d'identifier les tests statistiques possibles pouvant être réalisés (Ghasemi & Zahediasl, 2012). Ensuite, une analyse ANOVA était effectuée. L'analyse en question était une ANOVA à un facteur à mesure répétée utilisant un intervalle de confiance

de 95% et la méthode post-hoc de différence significative minimale (LSD) de Fisher était utilisée.

Pour l'analyse de données, les enregistrements XSens étaient utilisés lorsque la condition de corridor naturel devait être incluse dans la comparaison. Lorsque deux conditions sur tapis roulant étaient comparées, les données du système Vicon étaient utilisées afin d'avoir la plus grande précision.

Pour effectuer l'analyse cinématique, les points suivants ont été analysés : minimums et maximums de flexion/extension au genou droit et gauche lors de la marche, minimums et maximums de flexion/extension de la hanche droite et gauche lors de la marche, l'amplitude du mouvement de flexion du genou droit et gauche lors de la marche, l'amplitude du mouvement de la hanche droite et gauche lors de la marche, la flexion/extension du genou gauche et droit au moment d'attaque du talon /décollement des orteils et la flexion/extension de la hanche droite et gauche au moment de l'attaque du talon/décollement des orteils.

3.4 Résultats

3.4.1 Description des candidats

Pour cette étude, 15 participants ont été recrutés. De ces 15 candidats, 14 ont complété l'étude avec succès. Le participant qui n'a pas complété l'étude souffrait d'un problème au niveau de la vision spatiale, c'est-à-dire qu'il ne percevait pas les trois dimensions avec sa vision, et a alors développé un cybermalaise fort lors du premier essai en RV. Les 14 participants restants étaient composés de sept femmes et de sept hommes ayant un âge moyen de $25,6 \pm 8,6$ ans. Aucun des participants ne souffrait de condition susceptible d'affecter leur démarche, ou leurs sens de l'équilibre, Aucun ne présentait de douleur ou d'inconfort au niveau de leurs membres inférieurs. Tous les participants avaient une vision parfaite ou corrigée. Aucun participant ne

souffrait de cinétose. Neuf des quatorze participants disaient avoir déjà marché sur un tapis roulant et s'identifiaient comme confortables à marcher sur un tapis roulant. L'ensemble des participants, sauf un (participant 9), identifiaient leur jambe droite comme étant leur jambe dominante.

3.4.2 Cinématique

L'ANOVA n'a révélé aucune différence significative au niveau de la flexion du genou. La Figure 3.10 présentent la moyenne de flexion au genou droit, pour le participant typique (sujet 5).

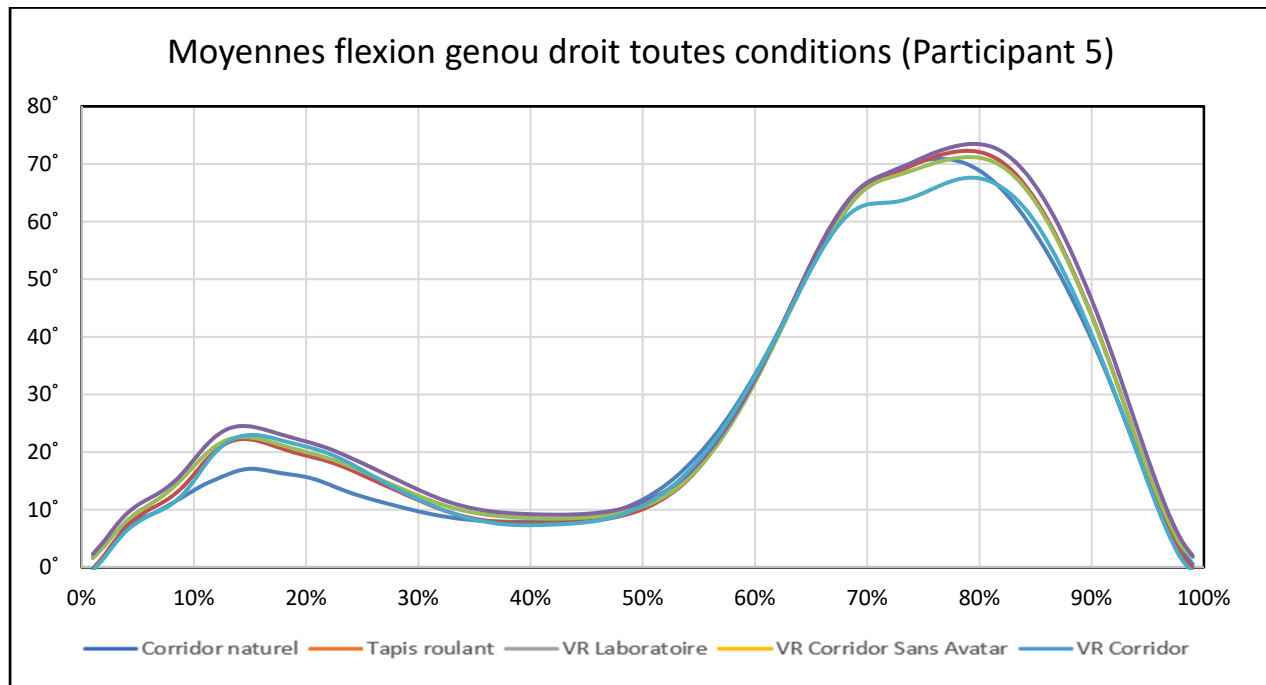


Figure 3.10 Moyennes de flexion du genou droit pour toutes conditions (participant 5)

L'ANOVA n'a révélé aucune différence significative au niveau de la flexion de la hanche. La Figure 3.11 présente la moyenne de flexion à la hanche droite, pour le sujet typique (sujet 5).

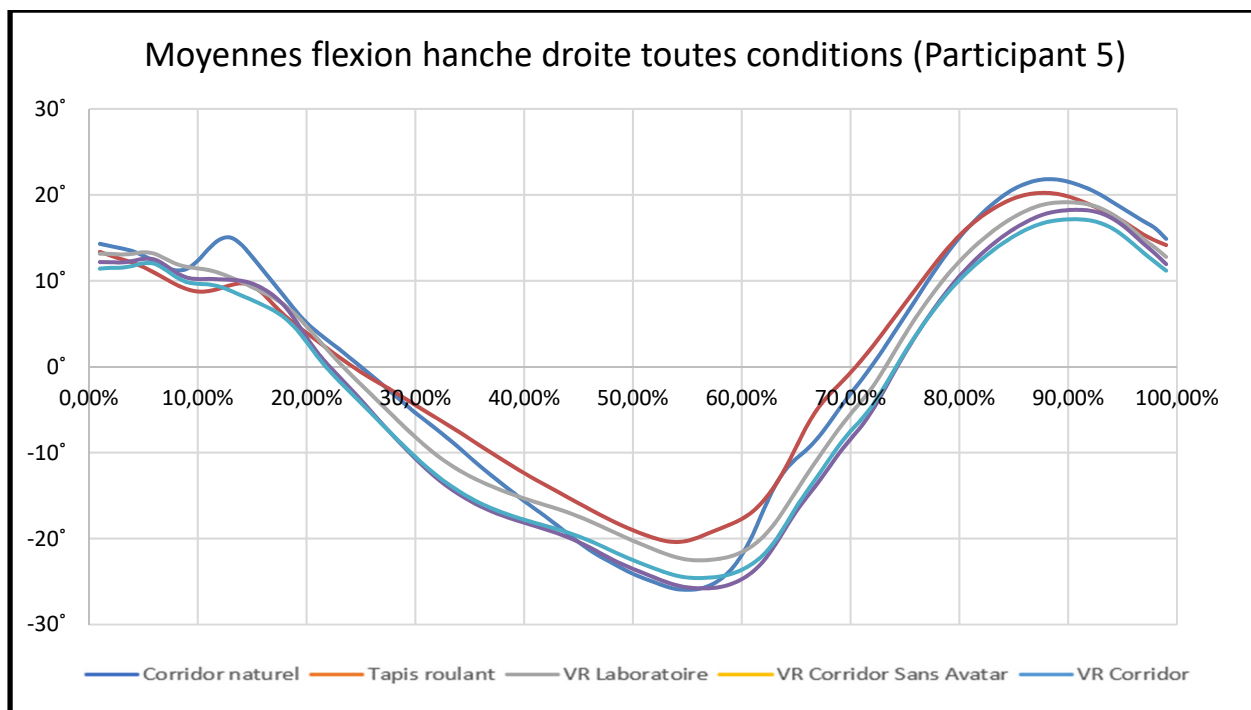


Figure 3.11 Moyennes de flexion de la hanche droite pour toutes conditions (participant 5)

L'ANOVA n'a révélé aucune différence significative pour l'amplitude de mouvement au genou. La Figure 3.12 présente les moyennes d'amplitudes du genou droit, pour tous les participants.

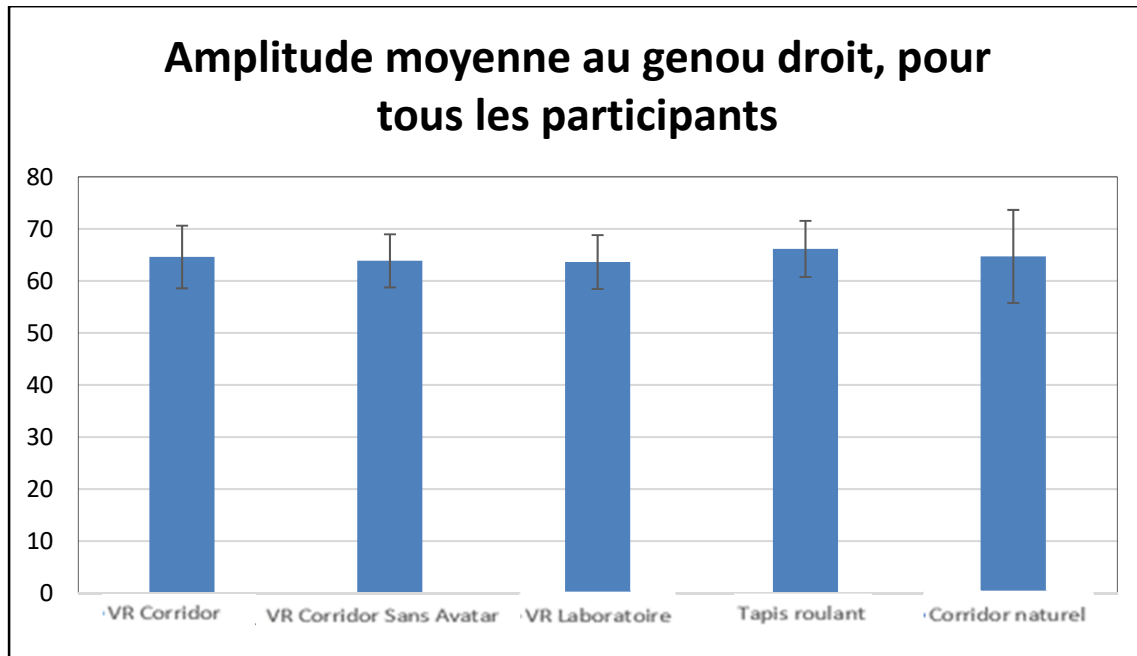


Figure 3.12 Moyenne d'amplitudes de flexion/extension du genou droit pour toutes les conditions

L'ANOVA n'a révélé aucune différence significative pour l'amplitude de mouvement à la hanche. La Figure 3.13 présente les moyennes d'amplitudes de la hanche droite.

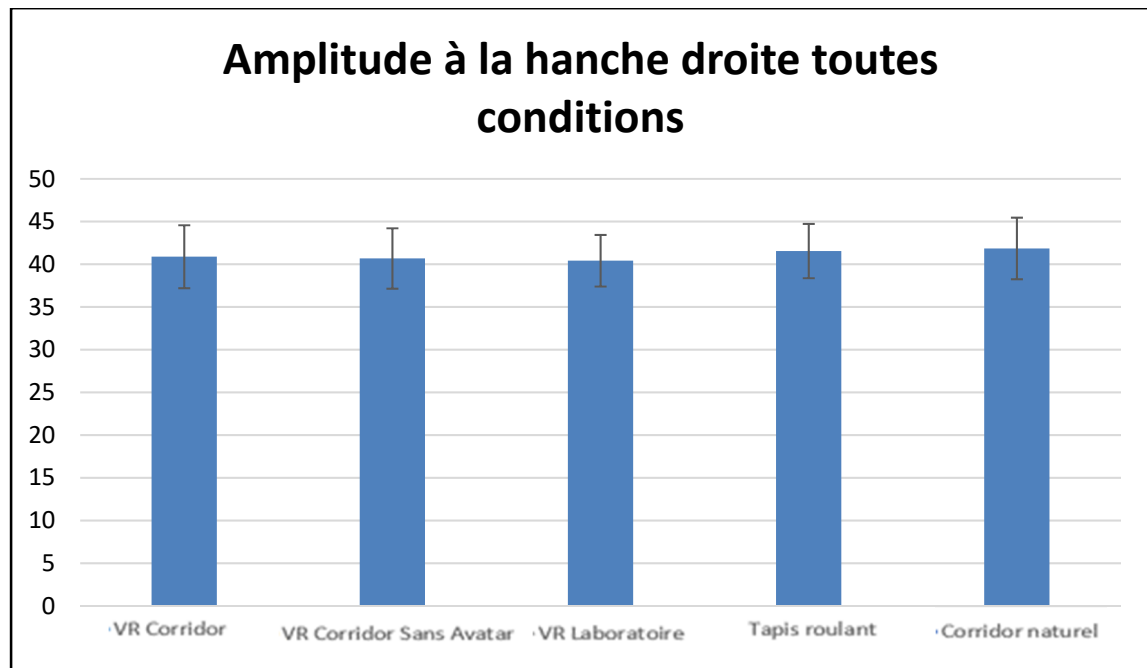


Figure 3.13 Amplitude flexion/extension de la hanche droite pour toutes les conditions

L'ANOVA n'a révélé aucune différence significative en ce qui concerne la flexion/extension des genoux et des hanches lors des moments d'attaque du talon/décollement des orteils.

3.4.3 Paramètres spatio-temporels

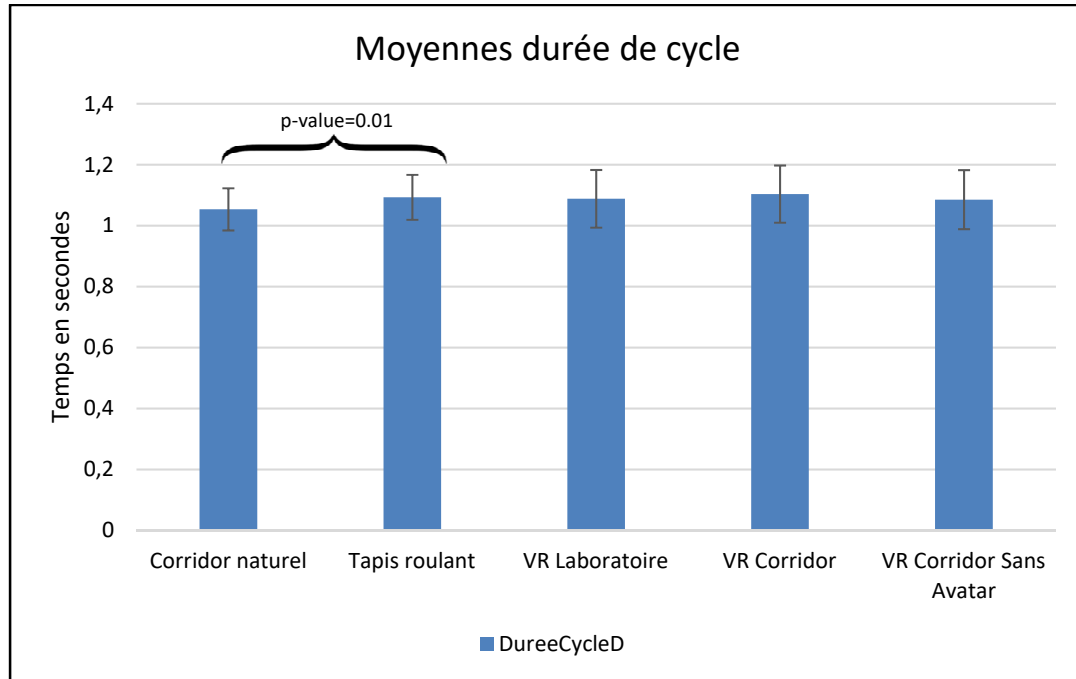


Figure 3.14 Moyennes de la durée de cycle de marche

L'ANOVA a révélé une différence significative entre les durées de cycle moyen des conditions de corridor naturel et de tapis roulant. La durée de cycle sur le tapis roulant en vitesse fixe sans RV est de 0.04 s plus grande ($p\text{-value} < 0.01$) comparativement à la durée de cycle en corridor réel, cette différence demeure pour toutes les conditions effectuées sur un tapis roulant, tel que présenté à la Figure 3.14.

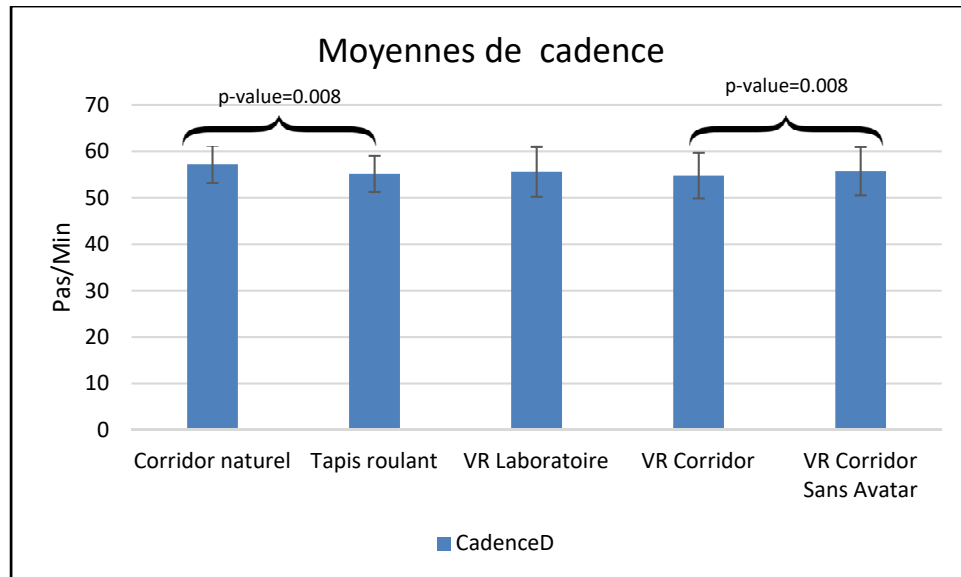


Figure 3.15 Moyennes de la cadence

La cadence est réduite de 2.05 pas/min lorsque les participants marchent sur le tapis roulant comparativement à la cadence de marche sur corridor réel ($p\text{-value} < 0.01$). L'ajout de l'avatar réduit la cadence de 0.95 pas/min lorsque les conditions de marche en corridor virtuel avec égo-avatar et sans égo-avatar sont comparées ($p\text{-value} < 0.01$), tel que présenté à la Figure 3.15.

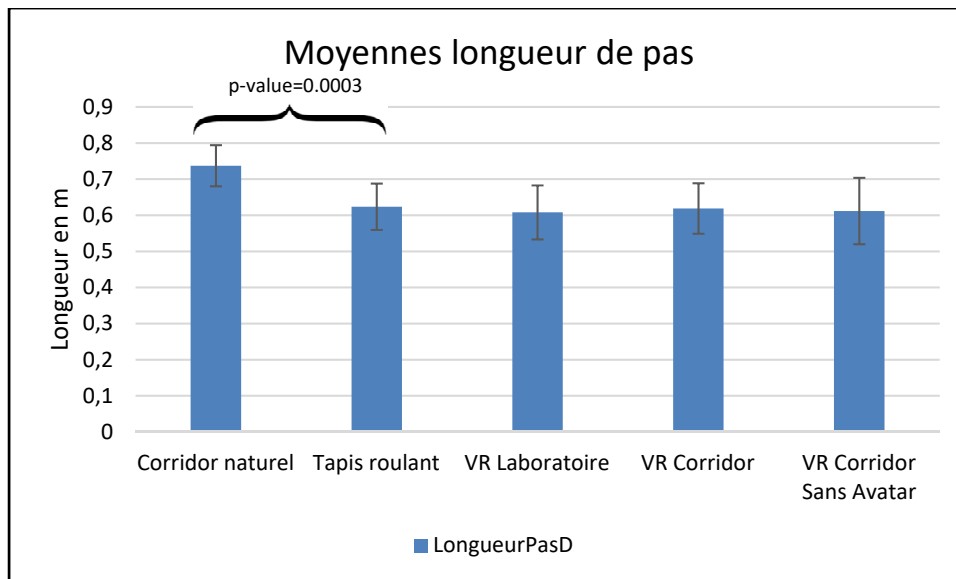


Figure 3.16 Moyenne de la longueur de pas en mètre

La longueur de pas est réduite pour toutes les conditions de marche sur tapis roulant, lorsque comparée au corridor réel. La différence entre le corridor naturel et le tapis roulant est de $0,1135 \pm 0.05$ m ($p\text{-value} < 0.01$), tel que présenté à la figure 3.16.

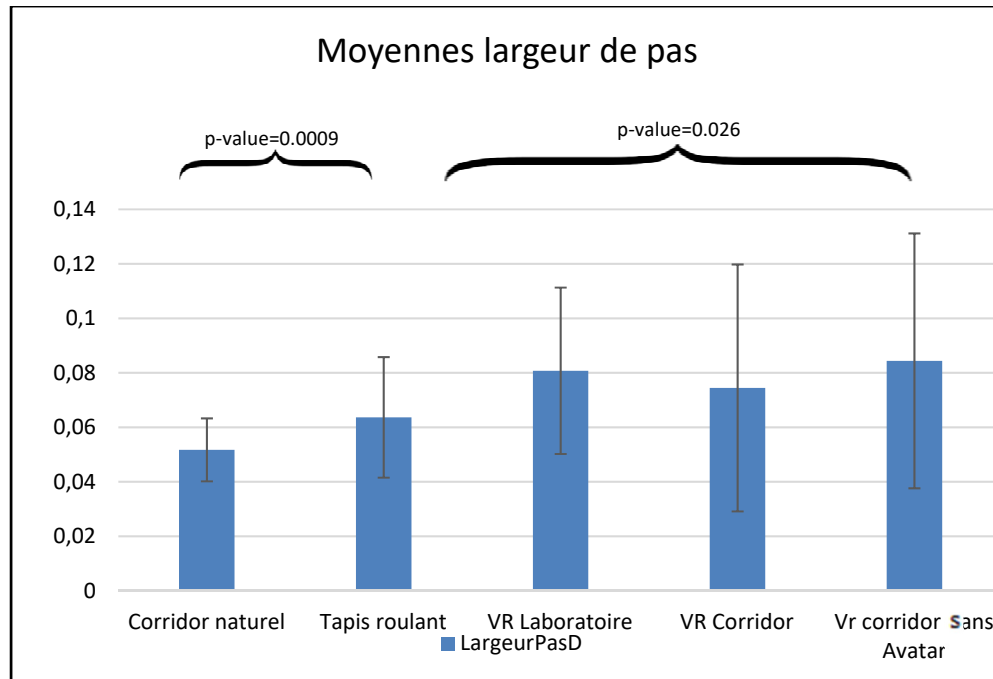


Figure 3.17 Moyennes de la largeur de pas

La largeur de pas est augmentée lorsque les participants marchent sur le tapis roulant de $0,01 \pm 0,02$ m ($p\text{-value} < 0,01$). Aucune différence significative n'a été identifiée quant à la différence de largeur de pas pour les conditions effectuées sur le tapis roulant. Cependant, la différence existante entre la largeur de pas sur tapis roulant sans RV et la largeur de pas en RV sans égo-avatar est significative : $+0,02$ m ($p\text{-value} < 0,03$), tel qu'illustré à la Figure 3.17.

3.4.4 Résultats qualitatifs

Les résultats pour le questionnaire d'expérience d'incarnation de l'avatar sont les suivants :

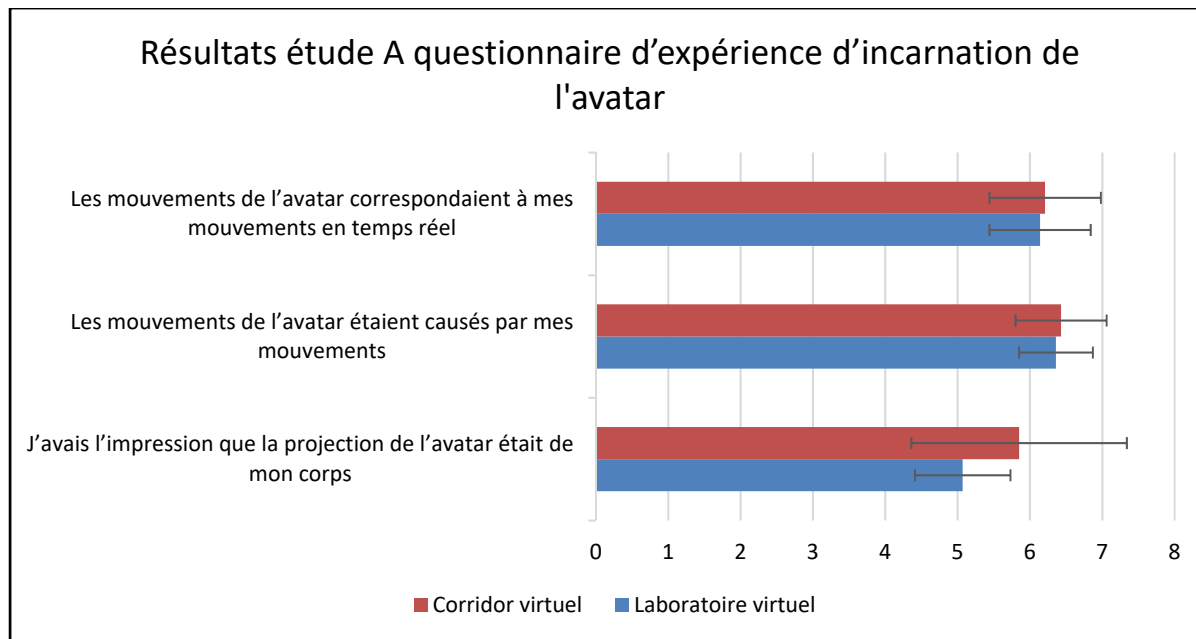


Figure 3.18 Résultats étude A questionnaire d'expérience d'incarnation de l'avatar

Les résultats en lien avec le questionnaire sur les cybermalaises sont les suivants :

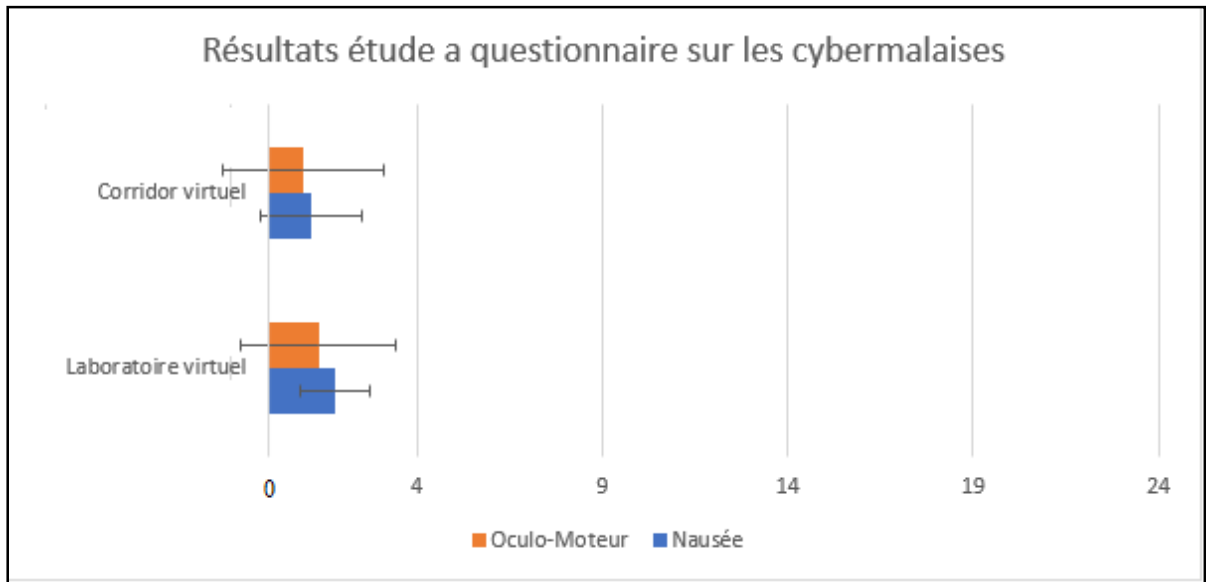


Figure 3.19 - Résultats du questionnaire sur les cybermalaises pour l'étude A

Tableau 3.3 Score de présence pour l'étude A

Égo- avatar	Réalisme /49	Possibilité d'agir /28	Qualité de l'interface /21	Possibilité d'examiner /21	Auto- évaluation performance /14	Auditif /21
Avec avatar	34,3 ± 5,4	21,6 ± 3,9	4,9 ± 2,7	15,7 ± 2,9	13,2 ± 1,3	16,1 ± 2,7
Sans avatar	35,6 ± 5,1	23,1 ± 5,0	5,75 ± 3,2	16,75 ± 3,2	12,8 ± 1,2	16,6 ± 2,5

Pour les questionnaires, aucune différence significative n'a été identifiée. Pour l'échelle de la qualité de l'interface, dans le tableau 3.3, celle-ci est inversée par rapport aux autres échelles, le résultat visé est donc un petit pointage.

3.5 Discussion

À la suite de la réalisation de l'étude A, soit celle portant sur l'analyse de l'impact d'un avatar sur la marche en EV, les données révèlent certains points intéressants. Premièrement, le fait que la largeur de pas augmente entre la marche en corridor réel et la marche sur tapis roulant sans RV suit la littérature (Sloot, van der Krogt, & Harlaar, 2014; Yang & King, 2016). La différence trouvée dans la présente étude est une réduction de la longueur de pas de $15,3 \pm 6,4\%$ lorsque les participants marchent sur un tapis roulant, comparativement à une réduction d'environ 1,5% dans la littérature. La présente étude montre une augmentation de $18,1 \pm 8,4\%$ de la largeur de pas lorsque les participants marchent sur le tapis roulant, comparativement à une augmentation d'environ 5.2% dans la littérature. Les amplitudes plus grandes trouvées dans cette étude pourraient être causées par le petit nombre de participants ainsi que l'utilisation d'un grand nombre de capteurs, ce qui pourrait rendre les participants plus inconfortables. Aussi, la majeure partie des participants s'identifiaient comme étant inexpérimenté à la marche sur tapis roulant, ce qui pourrait augmenter également leurs niveaux d'inconfort. Ces études montrent que, lorsqu'une personne marche sur un tapis roulant, leur marche n'est pas représentative d'une marche en espace libre, caractérisée par une longueur de pas plus petite et une vitesse de marche plus lente, ainsi qu'une largeur de pas plus élevée. Ensuite, le fait que la largeur de pas augmente également entre la marche sur tapis roulant sans RV et la marche sur tapis roulant avec RV, bien que de façon non-significative, montre que le système utilisé reproduit les comportements trouvés jusqu'à maintenant dans la littérature (Mirelman et al., 2011; Samaraweera et al., 2013; Sheik-Nainar & Kaber, 2007; H. Sveistrup, 2004; Heidi Sveistrup, 2004). La largeur de pas est augmentée d'environ $+0,038\text{m}$ dans la littérature et $0,016 \pm 0,024\text{m}$ dans la présente étude. La longueur de pas est réduite d'environ $0,045\text{m}$ dans la littérature et de $0,04 \pm 0,01\text{m}$ dans la présente étude. La cadence de marche est également moins élevée lorsque les participants marchent en RV, -13% dans la littérature et $-4.30 \pm 0.7\%$ dans cette étude. Bien qu'aucun changement significatif n'ait été trouvé en ce qui concerne la cinématique (flexion hache/genou, amplitude hanche/genou), une tendance peut

être observée. Cette tendance montre que les participants ont un mouvement à la hanche plus près du corridor naturel lorsque l'égo avatar est présent voir Figure 3.11. En effet, 7 des 14 participants ayant complétés l'étude montrent cette tendance. Un plus grand nombre de sujets pourrait aider à confirmer ou infirmer cette tendance. En ce qui concerne les paramètres spatio-temporels, l'ajout de l'égo-avatar temps réel réduit la cadence des participants lorsque comparé à la condition de marche RV en corridor virtuel sans égo-avatar, ce résultat est très similaire à celui de Samaraweera (Samaraweera et al., 2013) lorsque qu'ils comparent l'amplitude de mouvement chez les personnes hémiparétiques avec et sans égo-avatar en condition de latence. Les différences notées par ces chercheurs sont que les participants avaient une cadence réduite ainsi que des pas plus lents et plus courts dans toutes les conditions comportant de la RV. Pour l'étude A, la réduction de 0,95 pas/min pourrait être expliqué par le fait que les participants sont plus conscients de leurs mouvements lorsqu'ils sont représentés par un égo-avatar temps réel, ce qui expliquerait également la largeur de pas moins importante et la longueur de pas légèrement plus courte lorsque l'égo-avatar temps réel est présenté aux participants. Les participants pourraient être plus conservateurs dans leurs mouvements, étant plus conscients des limites physiques du tapis roulant lorsque leur corps est complètement reproduit dans le monde virtuel. Cet aspect pourrait être utile afin d'élaborer des entraînements visant à augmenter la stabilité lors de la marche chez des patients représentant un trouble de l'équilibre. La même étude pourrait être reproduite, mais avec des périodes de marche plus longues ou des séances de marche répétées, afin d'observer si l'aisance des participants peut les mener à porter moins attention à leurs mouvements dans le monde virtuel. À la suite des résultats de cette étude, l'utilisation d'égo-avatar temps réel ne modifie pas de façon significative la marche. Bien que certaines tendances soient présentes, aucun changement significatif ne montre un éloignement de la marche sur tapis roulant lorsqu'un égo-avatar est présent, mais l'égo-avatar n'approche pas, de façon significative, la marche des participants vers une marche en corridor naturel. Par contre la présence l'égo-avatar temps réel aide à améliorer la présence et donne l'opportunité d'introduire l'incarnation dans le système. Suite à l'analyse des questionnaires, la présence de l'égo-avatar n'affecte pas la perception des participants envers leur performance

ou leurs actions (voir tableau 3.4-3). Il est également intéressant de noter que la présence d'un environnement dynamique, dans ce cas le corridor virtuel, bien que non significatif, semble augmenter le sentiment de présence et réduire l'impact du cybermalaise sur les participants (voir Figure 3.18 et 3.19). Cette donnée pourrait être expliquée par l'interactivité créée dans l'environnement dynamique, permettant aux utilisateurs de moins se concentrer sur leur égo-avatar et ainsi agir plus naturellement lors de la marche en RV. Il est important également de noter que puisque la présence d'égo-avatar ne perturbe pas la marche, leurs utilisations pourraient être bénéfiques. Les participants se sentent plus impliqués dans l'exercice (de Rooij, van de Port, & Meijer, 2016), ce qui pourrait, à long terme, mener à de meilleurs résultats qu'un exercice de marche sans égo-avatar.

CHAPITRE 4

ÉTUDE B : GAITZILLA

4.1 Contexte

L'étude présentée dans ce chapitre vise à évaluer la question de recherche suivante : est-ce que la nature d'un égo-avatar temps réel, présenté à l'aide de la RV immersive, a un impact sur la marche. Cette étude utilise la même base logicielle que l'étude A (Marche virtuelle), présentée au chapitre 3. Des modifications ainsi que des ajouts ont été apportés à ce logiciel afin que celui-ci soit en mesure de répondre aux exigences de la présente étude devant être réalisée. Par exemple, un environnement virtuel, un égo-avatar supplémentaire ainsi qu'une méthode d'animation différente ont été introduit au projet. L'égo-avatar ajouté est un avatar ludique ayant l'apparence du personnage fictif Godzilla. Afin de vérifier si l'égo-avatar provoque une différence dans le mouvement des membres inférieurs lors de la marche et de la réalisation d'une tâche motrice, un exercice de placement de pieds (écrasement de chars d'assaut) a été introduit. Les paramètres cinématiques, cinétiques ainsi que spatiotemporels ont été utilisés afin d'évaluer l'impact des deux différents égo-avatars sur la marche.

4.2 Objectif

L'objectif de cette étude est de quantifier l'impact de la nature d'un égo-avatar sur la marche, en exposant les participants à deux conditions de marche identiques, mais en incarnant par deux égo-avatars différents.

4.3 Méthodologie

4.3.1 Matériel pour l'acquisition du mouvement

Ce projet étant réalisé uniquement sur tapis roulant, les systèmes Vicon et *Advance Mechanical Technology inc.* (AMTI) ont été utilisés. Le système Vicon, composé de 12 caméras optoélectroniques (Vicon T20-S) sert à l'acquisition du mouvement cinématique des participants et le système AMTI, composé du tapis roulant capable de capter les forces de réaction au sol, était utilisé afin de mesurer les paramètres cinétiques de la marche. Les caméras du système Vicon étaient positionnées en cercle autour du système AMTI, afin de maximiser la couverture d'acquisition. Les participants étaient équipés de 16 corps rigides composés de trois ou quatre marqueurs passifs, positionnés au même endroit que pour l'étude Marche virtuelle (Figure 4.1). Pour enregistrer le mouvement, le logiciel Vicon Tracker 3.3 était utilisé, permettant l'enregistrement des données cinématiques et cinétiques des participants pendant les acquisitions.



Figure 4.1 Participante de l'étude B (Gaitzilla)

4.3.2 Environnements virtuels

Pour cette étude, deux EVs ont été utilisés. Le premier EV consistait en une reproduction du laboratoire d'acquisition du mouvement du LIO-CRCHUM (voir section 3.3.2). Les participants pouvaient voir le même environnement, à l'échelle, que celui du laboratoire physique. La Figure 4.2 montre cet environnement.

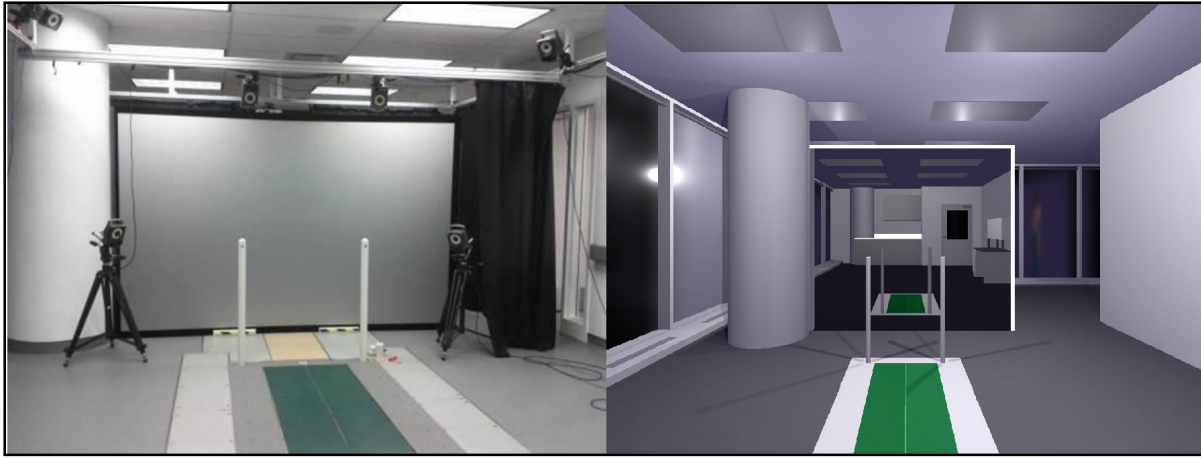


Figure 4.2 Gauche : laboratoire réel; droite : laboratoire virtuel

Le deuxième environnement développé pour cette étude consistait en une ville, présentant des gratte-ciels sur la gauche et la droite, dont le plus haut serait de cent mètres. Au centre se trouvait un boulevard composé de deux allées de deux voies chacune, séparées par un terreplein. L'égo-avatar temps réel était grossi à l'intérieur de la scène, ce qui donnait l'impression aux participants d'être géant; le gratte-ciel de cent mètres représentant une hauteur réelle de 2,3 mètres (facteurs d'agrandissement de 43). La largeur des rues était la même que la largeur physique du tapis roulant sur lequel les participants devaient marcher. Lorsque les participants marchaient, la ville défilait à la même vitesse que celle du tapis roulant et était reproduite infiniment, donnant l'impression d'un trajet infini de marche. La Figure 4.3 montre cet environnement.

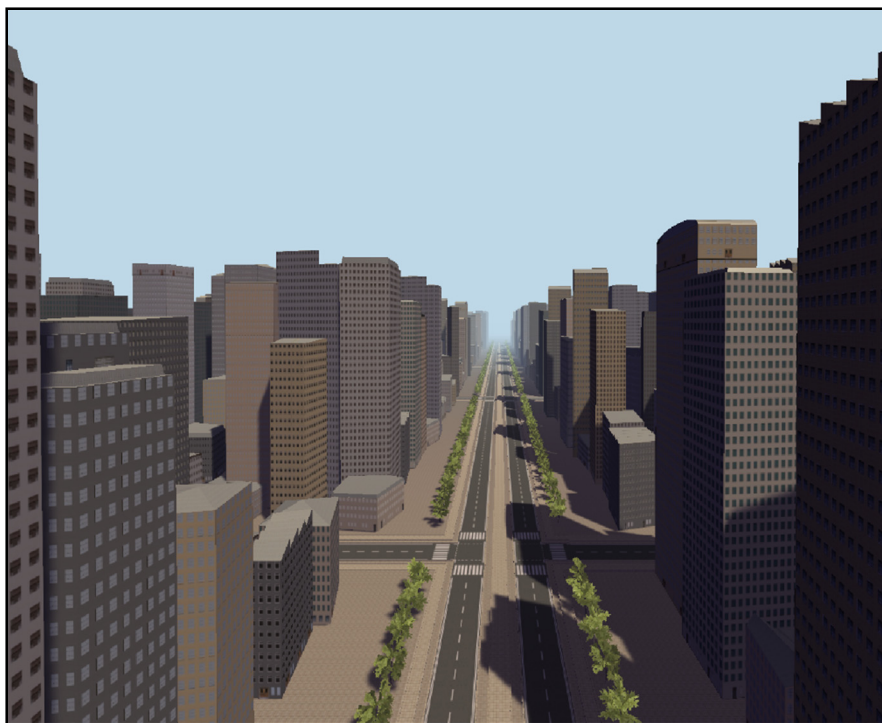


Figure 4.3 Environnement de marche (Ville virtuelle)

Dans cet environnement, les participants étaient représentés par des avatars ayant été grossis d'un facteur 43, donnant l'impression qu'ils sont 43 fois plus grands que dans le monde réel. Pour chaque pas effectué par les participants, un son accompagnait l'action de déposer son pied sur le sol. Pour l'égo-avatar humain, un son de talon déposé sur le sol était généré alors qu'un son lourd et bas était généré pour les pas effectués avec l'égo-avatar Godzilla. La position de leur tête, donc leur vision à partir du visiocasque, était d'environ 70 m de hauteur par rapport au sol virtuel. Afin d'assurer la sécurité des participants lors de la marche dans la ville virtuelle, un rectangle rouge était affiché au sol afin d'identifier les limites physiques du tapis roulant. Lors de la marche, les participants rencontraient des chars d'assaut, positionnés de façon pseudo-aléatoire, sur la rue. Ces chars d'assaut pointaient leur canon sur le participant et le but de la tâche était d'écraser le plus de chars d'assaut possible. Ces chars d'assaut avaient, comparativement au monde réel, des dimensions de 22 cm en longueur (9.5m en virtuel), de 10 cm (4.3m en virtuel) en largeur et de six cm en hauteur (2.6m en virtuel). Lorsque le

participant écrasait un char d'assaut avec son pied, celui-ci explosait, générant un son d'explosion ainsi qu'une animation d'explosion. Les chars d'assaut étaient positionnés sur la rue virtuel, dont les limites latérales étaient les mêmes que celle sur tapis roulant. La distance entre les chars d'assaut était aléatoire, mais la séquence des chars d'assaut était toujours la même afin d'assurer une répétabilité des résultats entre les participants. Cette séquence était la suivante : Extrémité gauche, extrémité droite, centre gauche et centre droit. Cette configuration a été choisie afin d'assurer un placement variable et étendu tout au long de l'exercice. La Figure 4.4 montre les chars d'assaut placés sur la rue dans l'environnement.



Figure 4.4 Chars d'assaut dans l'étude B
(Gaitzilla)

4.3.3 Animation d'avatar

Afin d'animer les égo-avatars temps réel, la méthode d'animation par cinématique directe, qui consiste à modifier tous les angles articuloire d'un squelette 3d de façon indépendante, développée par (Saint-Pierre Côté, 2017) a dû être modifiée pour cette étude, afin d'animer l'avatar virtuel Godzilla, ayant des proportions corporelles différentes d'un humain. Pour l'avatar Godzilla, les membres inférieurs sont 10% plus courts que ceux de l'humain et les bras sont 50% plus courts pour le Godzilla. Au lieu de la méthode d'animation directe, une méthode d'animation par différentiel d'angle a été utilisée afin d'animer les personnages virtuels de ce projet, car la cinématique directe (précédemment utilisée) présente plusieurs problèmes. Premièrement, si l'égo-avatar n'a pas les mêmes proportions que le participant, ce qui est le cas présentement avec le personnage Godzilla, celui-ci se trouve avec des déformations géométriques. Ensuite, comme la cinématique directe consiste à appliquer la position et l'orientation des articulations du participant sur celles de l'avatar avec un rapport un pour un, d'autres déformations peuvent être causées par des segments supplémentaires du côté de l'avatar, comme aux omoplates, au cou ou à la colonne vertébrale. Finalement, les orientations des membres terminaux (ex : mains, pieds, tête) de l'égo-avatar peuvent être mal définies avec la cinématique directe.

Les matrices des articulations sont normalement orientées avec l'axe principal pointant en direction de l'articulation suivante (i.e. l'axe principal du genou, pointe vers la cheville). La position neutre des membres terminaux de l'avatar est définie par une « pose en T » lors de la calibration, mais elle doit concorder avec l'armature du modèle 3D pour être bien orientée. Une technique d'animation dite différentielle a donc été développée afin de réduire ces effets. Cette technique consiste à appliquer les différences d'orientation produites par la cinématique directe sur les articulations de l'avatar (ex : une différence de 10° en flexion à la cheville dans l'animation directe engendre 10° de flexion à la cheville dans l'animation différentielle). Cela produit une animation fluide qui suit les mouvements par cinématique directe, sans déformer

l'aspect physique du personnage 3D, considérant que la pose en T du modèle 3D de l'avatar soit droite. Finalement, la position de l'avatar dans l'espace est ajustée en fonction de la position du bassin suivi sur le participant (position identique) et la hauteur de l'égo-avatar est définie par le segment le plus bas, dans ce cas-ci les pieds, de sorte qu'il puisse suivre le participant latéralement et que les pieds de l'avatar soient toujours à la hauteur du sol.

4.3.4 Protocole expérimental

Premièrement, les participants devaient lire et signer les documents d'éthique, approuvés par le comité d'éthique du CRCHUM et de l'ÉTS (Annexe X). Ces documents étaient le protocole détaillé ainsi que le formulaire d'information et de consentement. Ensuite, les participants devaient remplir le formulaire d'information générale (Annexe IX). Ils étaient ensuite mesurés et pesés. Les participants devaient ensuite remplir un formulaire afin d'évaluer leurs habitudes en ce qui concerne la pratique de jeux vidéo (Annexe IV). Ensuite, l'équipement permettant la capture de leurs mouvements était fixé sur les segments appropriés (voir Figure 4.5). Lorsque les capteurs étaient en place, les exercices de marche commençaient. D'abord, les participants devaient marcher sur le tapis roulant, sans aucun retour visuel virtuel, pour une durée de huit minutes. Cet essai permettait d'établir leur vitesse de marche ainsi que l'acquisition de leur patron de marche de base. Par la suite, les participants devaient réaliser la calibration fonctionnelle de leur égo-avatar (voir section 3.3.3). L'ordre dans lequel les égo-avatars de l'étude étaient présentés était défini aléatoirement afin de réduire l'effet de séquence dans les résultats. Pour les deux égo-avatars, les participants avaient tout d'abord une période d'environ cinq minutes afin de se visualiser, à l'aide d'un miroir virtuel, et de s'habituer à leur égo-avatar. Cette période servait à induire et renforcer le sentiment d'incarnation. Ensuite, les participants devaient réaliser deux tâches successives : marche sur le tapis roulant dans l'EV de la ville (4 minutes), exercice d'écrasement de chars d'assaut dans l'EV de la ville (nommés exercice-humain et exercice-Godzilla) (4 minutes). Pour chaque essai, 30 secondes d'enregistrement étaient effectuées pour la collecte de données. Après chacun des essais, les participants

devaient répondre aux questionnaires d'évaluation de l'état de présence (Annexe V), de cybermalaise (Annexe VI), d'évaluation du sentiment d'incarnation (Annexe VII) ainsi que le questionnaire d'évaluation de la préférence et de l'estimation du temps (Annexe VIII). L'ensemble des questionnaires était demandé pour les conditions marche-humain et marche-Godzilla. Cependant, le questionnaire d'évaluation de l'expérience utilisateur et de l'estimation du temps était demandé pour les trois conditions de marche (incluant la marche sans EV).

Après la complétion des essais avec les deux égo-avatars, l'équipement d'acquisition du mouvement était retiré et les participants pouvaient alors signer le formulaire de compensation financière et recevoir leur compensation de 15 \$. Le diagramme présenté à la Figure 4.6 résume le protocole effectué pour cette étude.

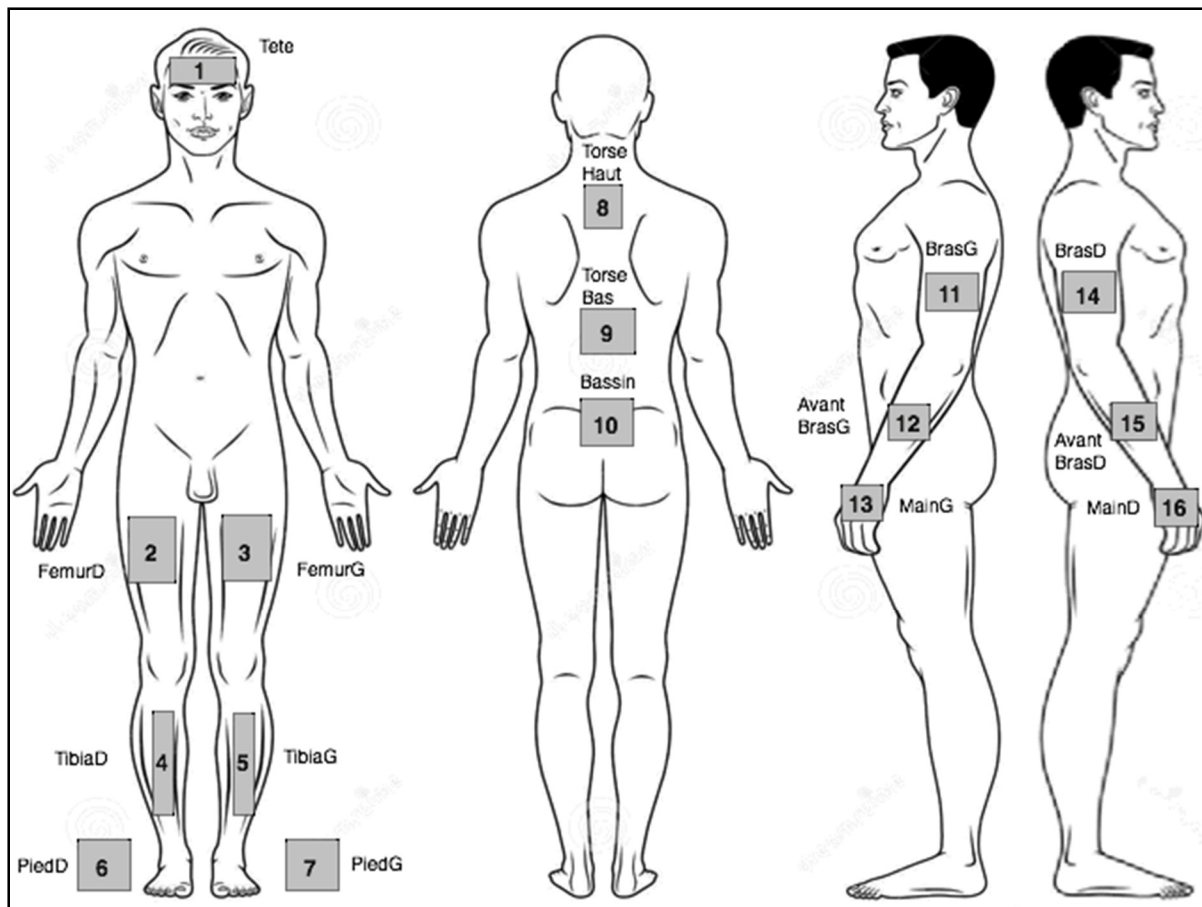


Figure 4.5 Schémas de positionnement des corps rigides
Tirée de Saint-Pierre Côté (2017)

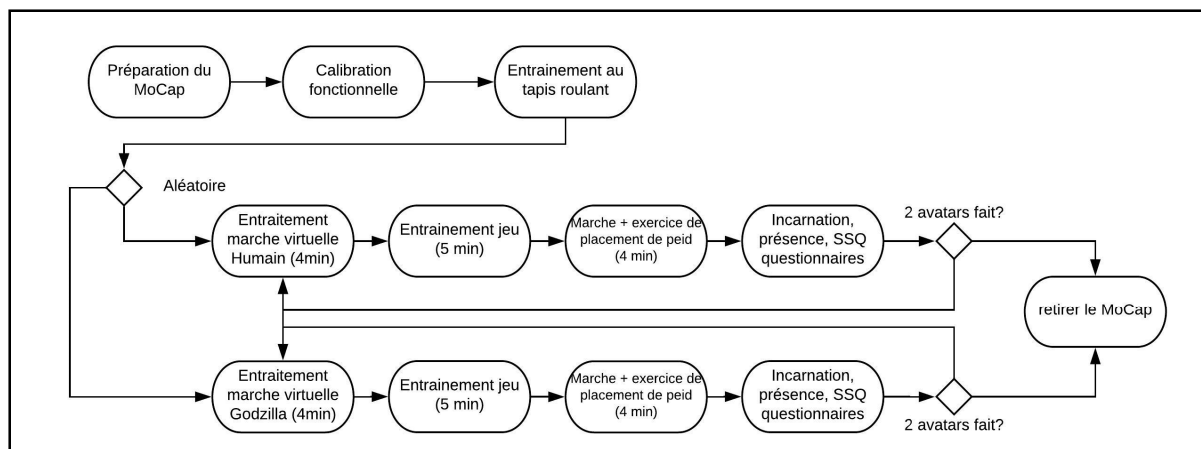


Figure 4.6 Protocole Gaitzilla

4.3.5 Analyse de données

Afin de bien extraire les données acquises, plusieurs outils ont été utilisés. Premièrement, l'ensemble des données a été nettoyé à l'aide du logiciel Vicon Nexus 1.8. Par la suite, ces données (quaternions de mouvements et signaux de forces de réaction au sol) ont été extraites à l'aide du logiciel de calcul Matlab. En raison des essais de placement de pied, la méthode de découpe du cycle de marche utilisant les forces au sol n'a pu être utilisée, les événements d'écrasement provoquant une perturbation dans le cycle de marche. Au lieu, la découpe du cycle par la vitesse angulaire du tibia a été utilisée (Jurri Taborri et al. 2016). À la suite de l'extraction des données à l'aide de Matlab, des statistiques simples ont été effectuées sur les données à l'aide du logiciel Microsoft Excel. Les statistiques effectuées étaient l'évaluation des moyennes et écart-types ainsi que des tests de type T bilatéral par paires.

4.4 Résultats

4.4.1 Description des participants

Pour cette étude, 20 candidats ont été recrutés. L'ensemble des candidats a complété l'étude. Les candidats étaient composés de 15 hommes et de 5 femmes, âgés en moyenne de $27,26 \pm 3,89$ ans. Aucun des participants ne souffrait de condition susceptible d'affecter leur démarche ou leur sens de l'équilibre et aucun ne présentait de douleur ou d'inconfort au niveau de leurs membres inférieurs. Tous les participants avaient une vision parfaite ou corrigée. Aucun participant ne souffrait de cinétose. Quinze des 20 participants disaient avoir déjà marché sur un tapis roulant et s'identifiaient comme confortables à marcher sur un tapis roulant. L'ensemble des participants identifiaient leur jambe droite comme étant leur jambe dominante.

4.4.2 Cinématique

Une différence significative entre le maximum de flexion à la hanche entre les conditions exercice-Humain et exercice-Godzilla a été identifiée. La flexion à la hanche étant plus grande de $4,21^\circ \pm 7,89$ lors de l'écrasement des chars d'assaut lorsque les participants incarnent le Godzilla ($p\text{-value} < 0.03$) (Figure 4.7).

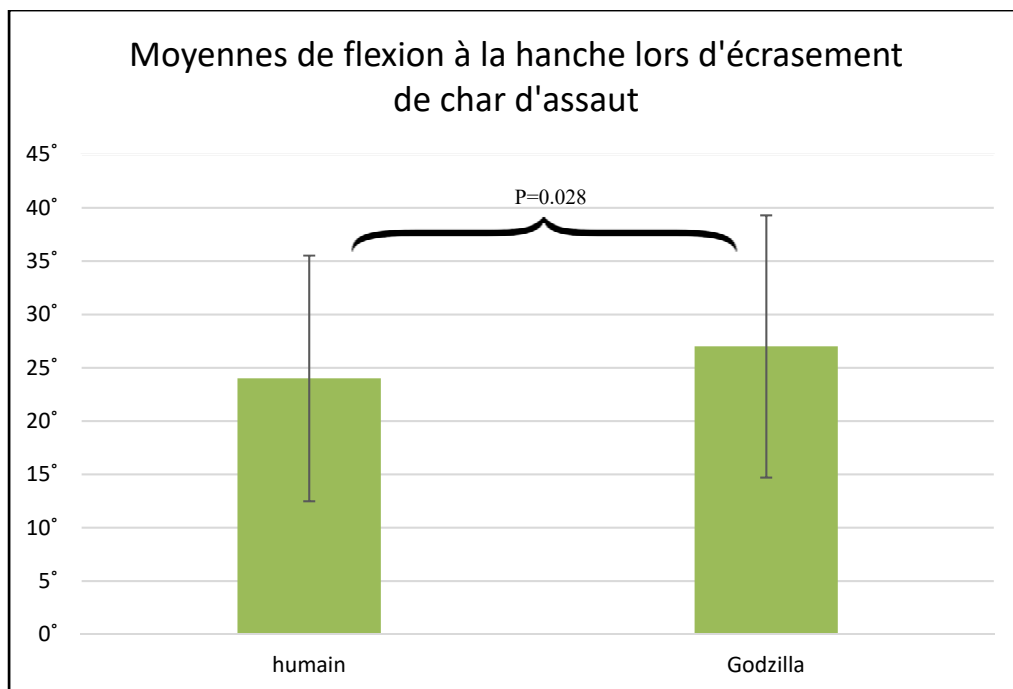


Figure 4.7 Moyennes au niveau de la flexion/extension de la hanche lors de l'écrasement des chars d'assaut (en degrés)

Par contre, aucune différence significative n'a été trouvée pour l'angle de flexion du genou lors de cette même condition (Figure 4.8).

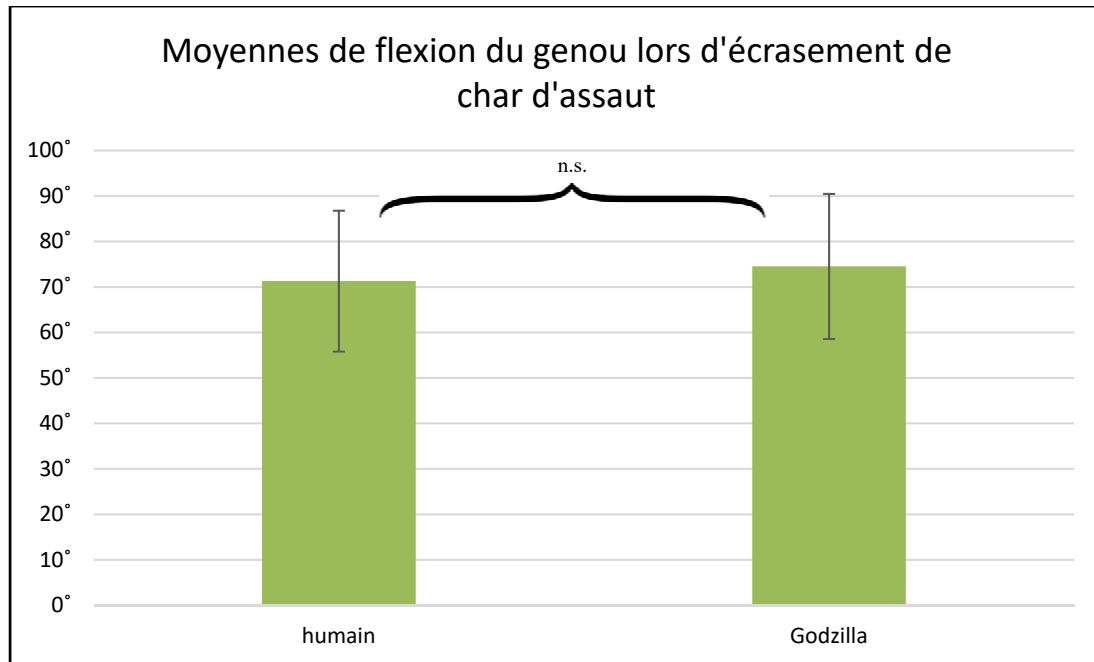


Figure 4.8 Moyennes au niveau de la flexion du genou lors de l'écrasement des chars d'assaut (en degrés)

Lors de la marche, aucune différence significative n'a été trouvée pour toute la cinématique des participants. Les points comparés pour cette analyse ont été la flexion de la hanche à l'attaque du talon, la flexion maximale, l'extension maximale ainsi que l'amplitude de mouvement. Les Figures 4.9 et 4.10 montrent les moyennes des angles de flexion pour les conditions de marche (égo-avatars humanoïde et Godzilla) d'un sujet typique (sujet 2).

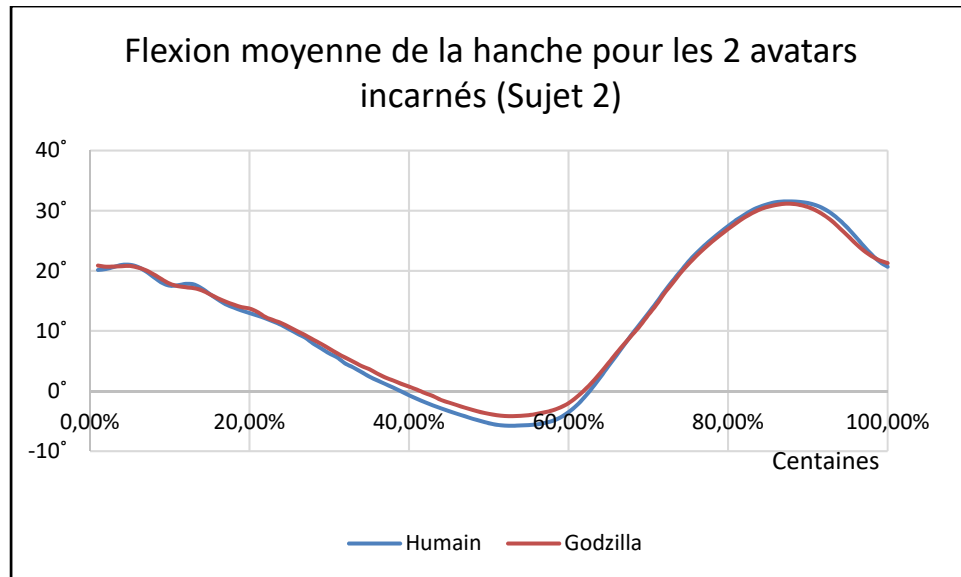


Figure 4.9 Flexion moyenne de la hanche en incarnant un avatar humanoïde et Godzilla (sujet 2)

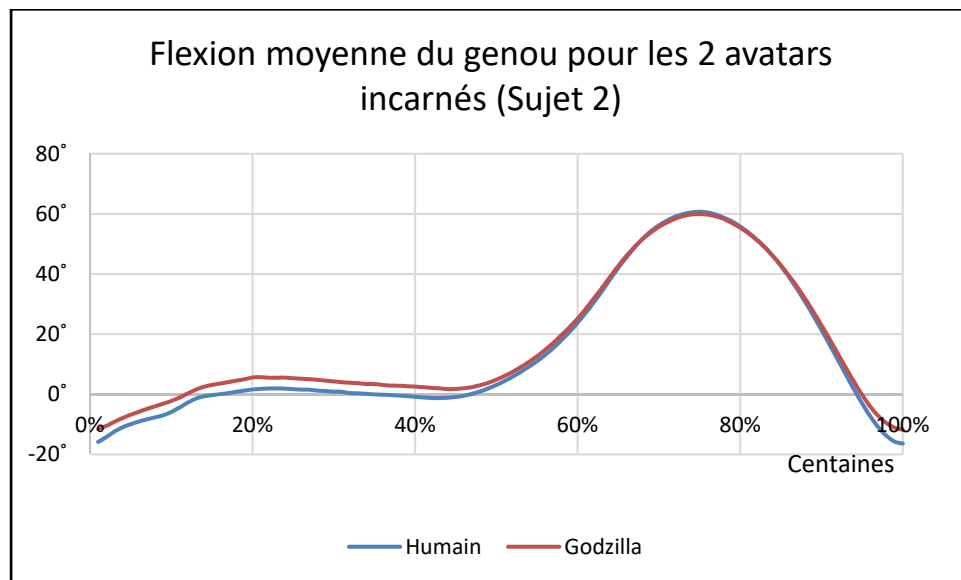


Figure 4.10 Flexion moyenne du genou en incarnant un avatar humanoïde et Godzilla (sujet 2)

4.4.3 Cinétique

Pour les données cinétiques, les tâches d'écrasement de chars d'assaut ont été comparées entre les différentes conditions. Une différence significative a été trouvée entre ces deux conditions, les participants appliquant une force généralement plus élevée de 83,39 N lorsqu'ils incarnent l'égo-avatar Godzilla ($p\text{-value} < 0.01$). La Figure 4.11 montre les deux moyennes de forces côte à côte.

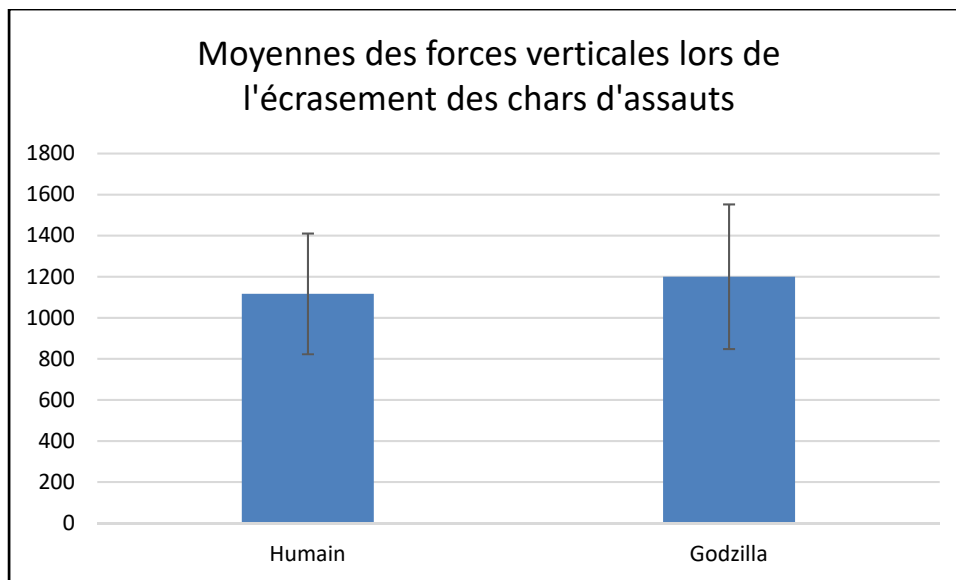


Figure 4.11 Moyenne des maximums de forces verticales lors de l'écrasement de chars d'assaut selon l'avatar incarné

4.4.4 Paramètres spatiotemporels

Aucune différence significative n'a été trouvée entre les deux conditions pour la longueur de pas. Les longueurs de pas étaient de $0,52 \pm 0,035\text{m}$ lors de la marche réelle, $0,51 \pm 0,043\text{m}$ lors de la marche effectuée avec l'égo-avatar humanoïde et de $0,53 \pm 0,07\text{m}$ lors de la marche effectuée avec l'égo-avatar Godzilla. La Figure 4.12 présente ces résultats.

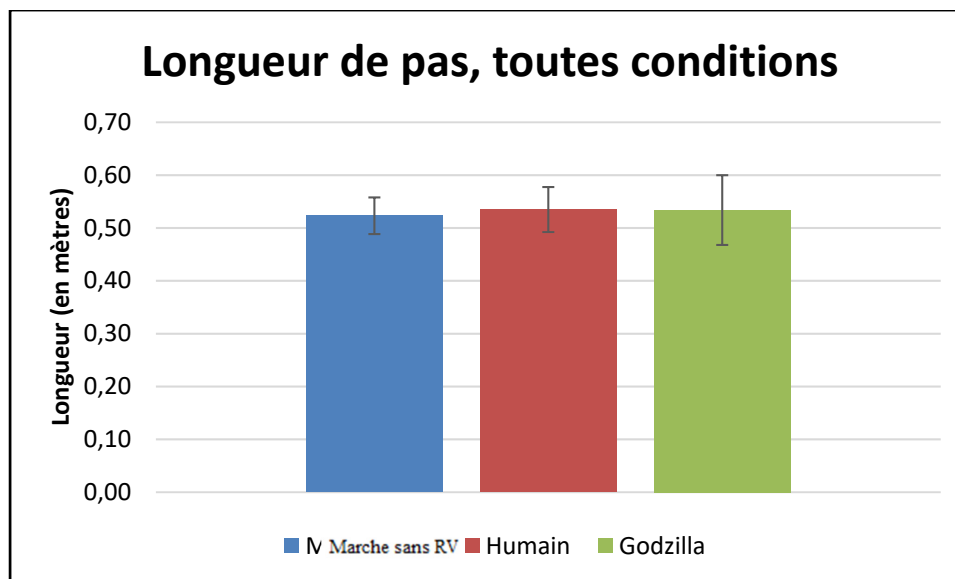


Figure 4.12 Moyennes de longueur de pas selon la condition d'incarnation

Aucune différence significative n'a également été trouvée entre les deux conditions pour la cadence. Les cadences sont de $51,42 \pm 2,37$ pas/min lors marche réel, $51,39 \pm 2,91$ pas/min lors de la marche effectuée avec l'égo-avatar humanoïde et de $51,95 \pm 4,61$ pas/min lors de la marche effectuée avec l'égo-avatar Godzilla. La Figure 4.13 présente ces résultats.

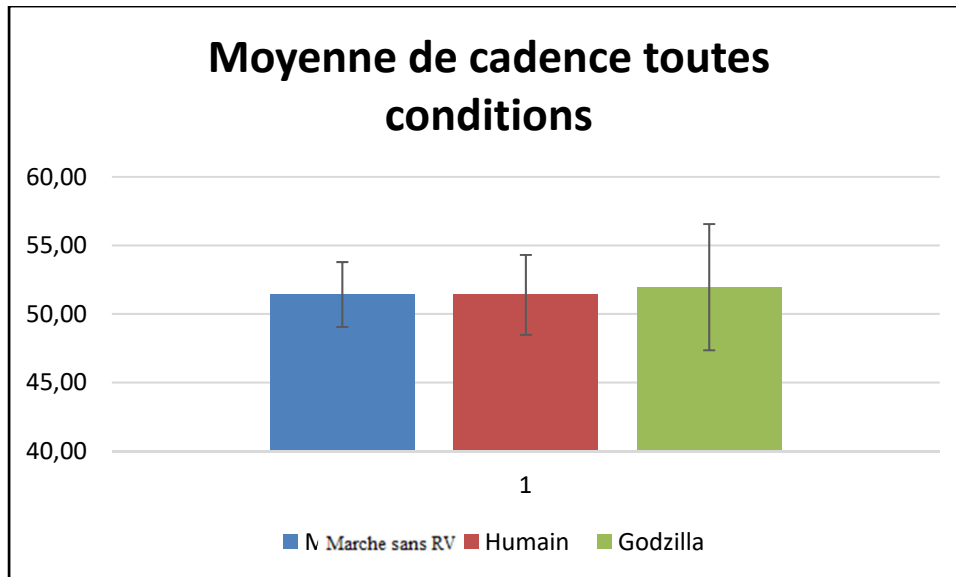


Figure 4.13 Moyennes de cadence selon la condition d'incarnation

4.4.5 Données qualitatives

Pour l'estimation du temps, les participants ont surévalué la durée de l'essai lors de la marche sans RV de 1,97%. Pour la condition de marche en RV avec l'égo-avatar humain, les participants ont sous-évalué la durée de l'essai par 10,5% et ont également sous-évalué le temps de l'essai lors de la marche en RV avec l'égo-avatar Godzilla de 22,3%. La différence entre la condition sans RV et la condition RV égo-avatar humain n'est pas significative ($p\text{-value} = 0.074$). Par contre, la différence présente entre les évaluations du temps lors de la marche sans RV et la condition RV égo-avatar Godzilla est significative ($p\text{-value} < 0.01$) ainsi que la différence entre la marche en RV avec ego-avatar humain et ego-avatar Godzilla ($p\text{-value} < 0.05$), ce qui identifie que les participants sous-évaluent le temps lors de la marche avec un l'égo-avatar Godzilla. Le tableau 4.1 présente les données en lien avec l'estimation du temps par les participants.

Tableau 4.1 Évaluation du temps pour l'étude B

Évaluation/Condition	Marche réelle	Marche RV humain	Marche RV Godzilla
Temps réel (minutes)	8	13	13
Temps évalué (minutes)	8,16±3,4	11.63±4,58	10.11±4,12
% d'erreur	+1,97%	-10,53%	-22,27%

En ce qui concerne l'appréciation globale de l'expérience, les sujets tendent à préférer la condition de marche avec l'égo-avatar Godzilla, mais la différence n'est pas significative. Le tableau 4.2 présente la différence entre ces deux conditions.

Tableau 4.2 Résultats de l'appréciation de l'étude B

Marche réelle	Marche RV Humain	Marche RV Godzilla
3,9/7 ± 1.38	5,4/7 ± 1,65	5,9/7 ± 1,63

Pour l'incarnation, les participants développent un plus grand sentiment d'incarnation lorsqu'ils sont représentés par l'égo-avatar humain. Spécialement lors de l'évaluation de la latence des mouvements reproduits. Le tableau 4.3 présente la différence entre ces deux conditions.

Tableau 4.3 Score de l'incarnation pendant l'étude B

Égo-avatar humain	Égo-avatar Godzilla
18,35 ±2.35 /21	17,00 ± 3,00 /21
p-value = 0,046	

Pour la présence et le cybermalaise, aucune différence significative n'existe entre les deux conditions de marche en RV. Le tableau 4.4 et 4.5 présente la différence entre ces deux

conditions. Pour l'échelle de la qualité de l'interface, celle-ci est inversée par rapport aux autres échelles, le résultat visé est donc un petit pointage.

Tableau 4.4 Scores de présence pendant l'étude B

Égo- avatar	Réalisme /49	Possibilité d'agir /28	Qualité de l'interface /21	Possibilité d'examiner /21	Auto- évaluation performance /14	Auditif /21
Humain	36,5 ± 7,4	22,8 ± 3,9	5,6 ± 2,8	16,5 ± 2,9	12,45 ± 1,6	17,25 ± 3,8
Godzilla	37,7 ± 5,3	22 ± 5,0	6,75 ± 3,5	17,25 ± 3,2	12,2 ± 1,4	17,6 ± 2,9

Tableau 4.5 Scores de cybermalaise de l'étude B

Égo-avatar	Nausée / 27	Oculomoteur / 21
Humain	2,5 ± 2,14	1,75 ± 1,94
Godzilla	2,15 ± 1,5	1,88 ± 1,88

4.5 Discussion

Le but de cette étude était d'explorer l'effet que deux égo-avatars différents pouvaient avoir sur le comportement moteur d'un participant lors de la marche. Pour réaliser cette étude, le comportement moteur de 20 participants a été comparé lorsqu'ils incarnaient deux types d'égo-avatar différents. Les résultats obtenus montrent une différence significative en ce qui concerne la tâche d'écrasement des chars d'assaut. En effet, les participants ont eu une amplitude supérieure à la hanche lors de l'écrasement des chars d'assaut en incarnant l'égo-avatar Godzilla par rapport à l'avatar humain. Les forces exercées lors de l'écrasement des chars d'assaut étaient également supérieures lorsque les participants incarnaient l'avatar Godzilla. Cependant, lors de la marche, aucune différence significative n'a été trouvée pour les paramètres cinématiques et spatiotemporels. Certains facteurs pourraient expliquer les

différences significatives observées lors de l'écrasement des chars d'assaut. Premièrement, tel que mentionné à la section 3.1, les deux avatars présentaient des proportions physiques différentes, l'avatar Godzilla ayant des membres inférieurs plus courts de 10%. Cette différence de proportion pourrait donner l'impression aux participants que leur jambe est moins élevée (lors de l'écrasement) et les mènerait à surélever leur jambe afin d'effectuer la tâche d'écrasement. Il est également possible que l'apparence physique de l'égo-avatar ait induit un comportement différent chez les participants. En effet, des changements comportementaux peuvent être observés lorsqu'une personne incarne un égo-avatar différent. Un tel exemple est l'étude comparant plusieurs égo-avatar et le comportement des participants lorsqu'ils jouent de la musique rythmée (Kiltner et al., 2013). Dans cette étude, les participants changent leurs rythmes ainsi que la fluidité de leurs mouvements en jouant du tambour lorsqu'il incarne un personnage rastafari, comparativement à des mouvements secs et peu rythmés lorsqu'ils incarnent un égo-avatar en veston et cravate. Avec l'incarnation qui est demeurée forte, il est possible que l'élévation de la jambe, ainsi que la force accrue lors de l'écrasement soit un effet de l'apparence de l'égo-avatar, les participants prenant alors les caractéristiques comportementales de celui-ci, interprétant qu'un monstre effectuerait de plus grands mouvements et serait plus fort lors d'un de l'écrasement d'une cible. Il est évident qu'une étude devrait être réalisée avec des avatars différents, ayant les mêmes proportions. Cette étude devrait être une reproduction complète de celle-ci, mais avec un avatar Godzilla modifiée pour joindre les proportions de l'avatar humain. Ces résultats (augmentation de l'amplitude du mouvement et de la force verticale) pourraient être des résultats intéressants en ce qui concerne la réadaptation de la marche puisque ce sont deux comportements favorables à un cycle de marche sain (Boudarham et al., 2013; Castelli, Paolini, Cereatti, & Della Croce, 2015; Hollman, McDade, & Petersen, 2011). Ce type de système pourrait s'avérer utile lorsqu'un comportement doit être adopté par un participant dans sa réadaptation. Dans ce cas-ci, de plus grand mouvement et une plus grande force dans l'atteinte de cible. Ces résultats montrent que l'apparence et/ou les proportions d'un avatar peuvent induire un changement moteur chez un participant.

Un autre résultat très intéressant de cette étude est celui par rapport à l'estimation du temps de l'exercice par les participants. En effet, l'apparence ludique de l'égo-avatar réduit le temps perçu par les utilisateurs de 11,74% lorsqu'il réalise le même exercice qu'en incarnant un égo-avatar humain standard ($p\text{-value} < 0,05$). Ce résultat va dans la même direction que celle de Bruder (Bruder & Steinicke, 2014) montrant que des avatars plus jeunes et plus attirants mènent à une plus petite perception du temps. Les résultats trouvés dans la présente étude sont, par contre, plus grands que ceux rapportés par Bruder (réduction de 6.5%). L'apparence ludique de l'égo-avatar Godzilla pourrait avoir un plus grand effet de réduction du temps perçu lors de la pratique d'une activité de réadaptation comparativement à un égo-avatar simplement d'apparence plus jeune. Aussi, la présence de l'égo-avatar Godzilla peut indiquer aux participants qu'ils pratiquent un jeu et non un exercice, ce qui expliquerait également cette réduction plus importante. Cette sous-évaluation du temps peut aider les exercices de réadaptation à être plus plaisants et sembler moins longs pour les participants, ce qui pourrait aider dans la motivation et l'adhésion des patients lors de programmes de réadaptation. Une étude visant à répéter le protocole réalisé, mais sur plusieurs séances, pourrait aider à identifier si ce sentiment est lié à l'aspect de nouveauté de l'exercice et de l'avatar (donc s'estomperait après quelques séances) ou si cette impression persiste.

CHAPITRE 5

DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce projet était d'identifier et de quantifier l'influence qu'un égo-avatar temps réel présenté à l'aide d'un visiocasque dans un EV immersif peut avoir sur le comportement moteur lors de la marche. Afin de répondre à cet objectif, deux études ont été définies afin de quantifier l'impact d'un égo-avatar temps réel sur la marche (étude A) ainsi que de quantifier l'impact que deux égo-avatars différents peuvent avoir sur la marche (étude B). Les participants ont été mis dans plusieurs conditions de marche afin d'évaluer et d'isoler l'impact des égo-avatars temps réel. L'absence d'égo-avatar temps réel ne semble pas influencer le comportement moteur, c'est-à-dire, lorsqu'aucun corps virtuel n'est présent dans l'environnement immersif, les participants arrivaient à marcher aisément sans modifier de façon significative leurs comportements moteurs, bien qu'ils préféreraient en majorité effectuer l'exercice en présence d'un égo-avatar temps réel. L'utilisation de différent égo-avatars temps réel semble induire une différence dans le comportement conscient des utilisateurs et non dans le comportement inconscient de ceux-ci. En effet, l'utilisation d'avatars différents mène à une cinétique différente lors de l'action de placement de pied pendant un exercice de marche. À la suite de la réalisation des deux études, nous arrivons à la sous-hypothèse #1 : la présence d'un égo-avatar temps réel qui aidera le participant dans son équilibre et dans l'aisance de ses mouvements et de sa prise de décision est confirmé, car les participants étaient plus conscients de leurs mouvements et portaient plus attention à l'impact de leurs mouvements lorsque l'égo-avatar était présent. La sous-hypothèse #2 touche l'aspect physique de l'avatar qui influencera les mouvements du participant. Celui-ci adoptera une marche ayant les caractéristiques du personnage incarné. Cette hypothèse n'est pas confirmée, car les participants n'ont pas modifié leur marche, qui est un comportement moteur inconscient, mais l'apparence de l'égo-avatar modifie leurs comportements moteurs conscients, soit l'action de placer le pied sur une cible lors d'un exercice de marche. En ce sens, l'hypothèse principale voulant que la présence d'un égo-avatar temps réel aidera les participants à adopter une marche se rapprochant d'une marche

normale en corridor physique est rejetée, car les variations dans les comportements moteurs des participants n'identifient pas que la présence d'un égo-avatar temps réel et mène les participants à adopter une marche plus naturelle que lorsqu'aucun égo-avatar temps réel n'est présent.

La présente étude comporte certaines limitations, la principale étant le nombre de participants (14 complet pour l'étude A et 20 pour l'étude B). Afin de confirmer ou d'infirmer les résultats identifiés dans ces études, un plus grand nombre de participants devrait être évalué. Aussi, le nombre de facteurs observés devrait être réduit. En observant beaucoup de facteurs, il est plus difficile d'en isoler quelques-uns en particulier. Dans l'étude B, l'effet de la nature de l'avatar n'est pas isolé de l'effet de ses proportions. Ainsi, une incertitude demeure quant à la source de l'effet observé. Pour l'étude A, l'environnement statique (laboratoire virtuel) pourrait également être retiré de l'étude, puisqu'il ajoute une lourdeur au protocole et introduit une variable supplémentaire dans l'analyse des données, celui d'un EV différent.

Avec les résultats des deux études, il est vrai de dire que les égo-avatars temps réel n'ont pas un grand impact sur la marche lorsque celle-ci est réalisée sur un tapis roulant à vitesse fixe. En effet, la présence d'un égo-avatar temps réel ne mène pas significativement à des avantages moteurs mais n'a également pas d'inconvénient. La présence d'un égo-avatar temps réel mène, par contre, à un exercice plus plaisant pour les participants, la présence d'un avatar menant à une présence légèrement plus élevée (étude A) et à une sous-estimation du temps d'exercice (étude B) de 10,53% en présence d'un égo-avatar standard et de 22,27% dans le cas où les participants sont en présence d'un égo-avatar plus ludique. Ces avantages peuvent mener à un exercice et à une expérience de réadaptation plus plaisante et peuvent donc aider dans un processus de réadaptation. L'ajout d'un égo-avatar permet également d'introduire le phénomène d'incarnation, ce qui aide à l'implication dans le monde virtuel et dans la réalisation des tâches demandées aux participants (Barr et al., 2006; Baylor, 2009; Betker et al., 2007; Heidi Sveistrup, 2004). En prenant en considération ces facteurs, l'utilisation d'égo-

avatar temps réel n'a pas d'impact positif ou négatif sur le comportement moteur lors de la marche, mais l'utilisation de ceux-ci est suggérée, car ils aident à améliorer l'expérience des utilisateurs lors de programme d'exercices et de réadaptation. Une étude visant à identifier l'impact d'un égo-avatar temps réel sur la marche sur tapis roulant à vitesse variable, tel que celui utilisé dans les recherches du Pr Aissaoui de l'ÉTS (Marcoux, 2015) ou dans un corridor réel, à l'aide de casque immersif sans fil et de capteurs inertiels, pourrait s'avérer utile afin de mieux isoler les impacts de l'égo-avatar sans qu'il ne soit influencé par l'aspect fixe d'un tapis roulant, dans sa vitesse ou dans son positionnement.

CONCLUSION

En conclusion, les méthodes utilisées dans ce projet permettent à un participant de marcher dans un corridor virtuel avec et sans égo-avatar ainsi que dans une ville fictive étant représentée par un égo-avatar à l'apparence humaine ou ludique. Les impacts d'un égo-avatar temps-réel sur la marche ont pu être isolés et évalués à l'aide de l'outil de RV produit pour ce projet de recherche. Cette étude est une étude exploratoire, visant à prouver l'utilité et l'impact des égo-avatars temps réel sur la marche. Afin de confirmer ou d'infirmer les pistes trouvées dans cette étude, une étude de marche en espace libre ou sur tapis roulant à vitesse variable pourrait aider à mieux isoler l'impact des égo-avatars sur la marche. Bien que cette étude montre que les égo-avatars n'ont pas d'impact sur la marche, les résultats trouvés indiquent que les participants utilisent le retour visuel plus activement lorsqu'un égo-avatar est présent, ayant plus de contrôle et faisant plus attention à l'impact de leurs mouvements. Les questions de recherche de cette étude méritent plus d'attention, les égo-avatar temps-réel étant largement utilisés dans le domaine de la réadaptation. Des études visant à évaluer l'impact de différents avatars, en proportion, poids, grandeur, forme ou races seraient intéressantes afin de mieux comprendre l'utilité et l'impact de ces égo-avatars sur le comportement moteur humain.

ANNEXE I

GAITZILLA : EXPLORING THE EFFECT OF EMBODYING A GIANT MONSTER ON LOWER LIMB KINEMATICS AND TIME PERCEPTION

Philippe Charbonneau ^a, Mikael Dallaire-Côté ^a, Sara Saint-Pierre Côté ^a, David R. Iabbe ^a,
Neila Mezghani ^b, Sharif Shahnewaz ^c, Imtiaz Arafat ^c, Tanvir Irfan ^c, Gavani Samaraweera ^c,
John Quarles ^c

^a Laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie, École de Technologie Supérieure,
1100 rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^b LICEF Research Center Teluq University.
4750 Avenue Henri-Julien Montreal, Québec Canada H2T 2C8

^c Department of Computer Science University of Texas at San Antonio,
1 UTSA Circle, San Antonio, USA TX 78249

This research was supported by NSERC (Natural Sciences and Engineering Research
Council of Canada and INTER (Interactive Technologies of Engineering in Rehabilitation)
Research group of FRQNT.

Article publié dans International Conference On Virtual Rehabilitation, Montréal, Canada
juin 2017

ABSTRACT

Previous research has shown that virtual embodiment can elicit behavioural change and increased motivation for exercise. However, there has been minimal research on how virtual embodiment can affect persons undergoing physical rehabilitation. We present a novel gait rehabilitation environment (Gaitzilla) in which the user embodies a gigantic Godzilla-like avatar while walking on a treadmill. He must step on tanks that are dispersed on the virtual street before him in order to survive. The required movements in the game are inspired by real gait training exercises that focus on foot placement and control. We present the result of a user study that explores the effect of embodying different avatars

during these exercises on a lower limb movement and on user appreciation. The long-term objective of this research is to improve gait (i.e., walking patterns) rehabilitation through the use of 3D user interfaces and virtual embodiment.

Keywords: Virtual embodiment, 3D User Interfaces, Gait rehabilitation, Serious games

INTRODUCTION

Gait rehabilitation is often a long term and repetitive process. From initial injury or onset of a disease, regaining significant mobility can take years [1]. During this period, patients are often required to perform many repetitive and/or painful exercises in order to regain their lost mobility. Many patients have motor control deficiencies of the lower limbs, which makes it difficult for them to place their foot on the ground where they intended to place it. Rehabilitation for such a problem requires repetitive practice of controlled foot placement, which can become boring for patients and therefore limit their motivation and perseverance in their rehabilitation program. To address this motivation issue, there have been many rehabilitation games that have been successful in helping to maintain motivation and make rehabilitation more entertaining [2]. Other games or virtual environments have been used to provide augmented biofeedback during rehabilitation. Providing augmented feedback is a common strategy to enhance motor learning by providing information about movement characteristics.

Immersive virtual reality (VR), whereby a user is completely visually immersed in a virtual environment (VE), offers the added possibility of controlling a user's visual self-representation in the VE. In other words, the user sees himself as an avatar rather than seeing his actual body. When visuomotor synchronicity is sufficiently high, this results in a subjective feeling of ownership of the avatar [1] (also called embodiment) where the user feels the avatar is his actual physical body. Recent studies in the field of psychology

have shown that when embodying a virtual body, users modify their behavior to match that of their virtual body [2].

However, there has been minimal research on how virtual embodiment can affect persons undergoing physical rehabilitation. Embodiment could be useful in at least three regards in such a context. First, the characteristics of the embodied avatar (its nature and its physical proportions, for example) could lead to automatic changes in the user's movement. This could be used to favour specific behaviours in a VE, such as movements of larger amplitude. Second, the embodiment of different avatars could further contribute to making the experience enjoyable, making rehabilitation seem less tedious and time consuming. Finally, avatar embodiment could be used to alter how a user visually perceives the movements he produces, in a kind of virtual mirror therapy [3], [4]. The current study is related to the two former.

The objective of this study was to explore how embodying different virtual avatars in immersive VR impacts behaviour and motivation in rehabilitation exercises such as treadmill gait and foot placement tasks. We conducted an experiment where participants embodied a giant monster avatar and a similarly-scaled human avatar in an urban city virtual environment (VE). Lower-limb kinetics and kinematics were measured while they walked down the main street of this city and had to crush small tanks as they came upon them. Participants also gave an estimation of the duration of the different conditions and a subjective appreciation of each. We hypothesized that embodiment would be similar for both avatars and that participants would crush the tanks with movements of larger amplitude when embodying the giant monster avatar. We also hypothesized that embodying any avatar would make the time spent completing the task seem shorter and

that embodying the monster would be more enjoyable.

BACKGROUND

Embodiment in VR

Virtual embodiment requires that people accept a virtual human-like representation as their own body. The first work supporting the plausibility of such plasticity of the human brain is known as the rubber-hand illusion [5]. The rubber-hand illusion demonstrated that humans are able to accept a rubber hand as their own hand. For example, if the rubber hand is ‘injured,’ the participant may try to pull their hand out of the way, even though it has no real connection to the rubber hand. This work was later adapted to full body-swap illusions using a real-world manikin and a video camera headset [6], and virtual full-body-swap illusions using a virtual avatar, a humanoid character, in a fully-immersive VE [7].

For healthy users, there has been much work showing that a self-avatar’s appearance and behavior can in turn affect a user’s behavior and attitudes in the real-world [8]. For example, exercising with a fitter appearance can improve exercise performance [9]; using a casually dressed dark-skinned avatar increases movement patterns in playing a hand drum [10]; using the body of a child results in implicit association of one’s self with child-like attributes [11]; using an elderly self-avatar improves attitudes towards the elderly and increases saving for retirement [9], [12]; using a self-avatar to saw virtual trees increases pro-environmental attitudes and encourages less use of paper in the real-world [13]; taller and more attractive self-avatars increase confidence and intimacy behaviors in social settings and negotiations [9], [14]; black-clothed self-avatars trigger more aggressive attitudes [15]; and embodiment of a black self-avatar reduces implicit racial bias [2].

Some experimental games use self-avatars to encourage behavior change. In *Quit It! And Smoke?*, the user guides his/her self-avatar to quit smoking [16], [17]. The self- avatar's body and behavior are affected by the user's gameplay choices, thus emphasizing the consequences of smoking on health. For example, an avatar would demonstrate craving-induced tremors if significant time passed since the last cigarette. At the same time, the avatar's body would become more fit and demonstrate improved performance in sports.

VR Rehabilitation and Games

Although embodiment has been minimally explored in VR rehabilitation, VR has been shown to have significant benefits to rehabilitation [18]. A VE is not subject to the dangers and limitations of the real world, which expands the types of exercises that patients can practice, while still having fun in the case of VR games. In general, research suggests that VR and VR games have measurable benefits for rehabilitation effectiveness [18][20] and motivation [21], [22].

IMPLEMENTATION OF GAITZILLA

Gameplay

An immersive VR game, Gaitzilla, was developed [23]. In this game, the user embodies a skyscraper-sized Godzilla-like monster or a human avatar of equal size. This is achieved by scaling down the VE by a factor of 43, which recreates the effect of the user being 43 times larger. He views his self-avatar from a first-person perspective through a head-mounted device (HMD). The position of his head in the VE is approximately 70 m from the ground, for both avatars. The entire body of the virtual avatar replicates the user's movements in real-time. Whenever the avatar's foot strikes the ground, a low bass sound that represents a "heavy" footstep is played.

During gameplay, the user is immersed in an urban city VE composed of different-size buildings and high-rises. The tallest of the buildings are approximately 100 m high in the VE, equal to 2.3 m in real world scale. As the user walks on a treadmill, his avatar walks down the main street of the VE at the same speed as the user is walking. The virtual street is aligned with the treadmill and the width of the treadmill matches the width of the virtual street. In the VE, a red outline delimits the contour of the treadmill belt in the physical world so that users are aware of their position and don't step off the treadmill. As the user progresses through the VE, the city is automatically generated so that it never ends. After 30 seconds of walking in the VE, the user comes upon tanks that are dispersed pseudo-randomly throughout the street, with their canons aimed towards them. These tanks are 22 cm long by 10 cm long and 6 cm high in the real world, which is equivalent to 4.3 m x 9.5 m x 2.6 m in the virtual world scale.

The object of the game is for users to crush as many tanks as possible by stomping down on them with either foot. When a tank is successfully crushed, it explodes and

disappears. An explosion animation and its associated sound provide visual and auditory confirmation that the tank has been crushed.

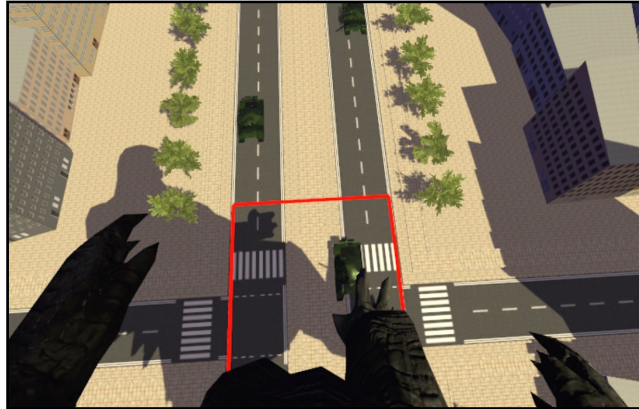


Figure-A I-1 A user embodying a giant monster avatar in the urban VE, looking down at his virtual body as he walks down the street

Game Design

The game was implemented in Unity3D 5.3. The 3D models of the avatars are from TurboSquid (Godzilla avatar) and Mixamo (human avatar) and were rigged using 3ds Max. The rigs both models have the same number of segments(19) and the joints were placed in the same positions relative to the models. Because of the the different nature of the avatars, the proportions of some of the segments are different. For example, the monster avatar has much shorter arms than the human (Fig. 2). Compared to the human avatar, the monster's upper limbs are 56% short, his torso is 24% longer and his legs are 10% shorter. In the human avatar, the thigh is approximately 1.1 times the length of the shank; in the monster, this ratio is 0.7.

The city is created procedurally using the BuildR Unity asset. The VE is composed of a

segment of three city blocks that are each 260 m in length (6 meters in real world scale) and this segment is repeated over and over as long as the user progresses in the game. Once the user has passed a segment of three blocks, it is moved ahead of the user, far enough to not be noticeable. This essentially creates an infinite street where the user can train for long periods without having to restart or change level, when he is sufficiently rehabilitated to do so.

The tanks that appear on the street are positioned pseudorandomly. The width of the street is divided into four lanes in which the tanks can be positioned. The game always starts with an empty street for the first 30 seconds and then tanks start to appear at an average rate of 2 tanks per city block in the VE (6 meters in the physical world). After 30 seconds of encountering tanks, there is another period of 30 seconds without tanks where the user walks normally. In a rehabilitation setting, these parameters could automatically adjust to the user's current capabilities so that the game remains challenging but not overly so.

The tanks are destroyed when the avatar's foot come into contact with the "Collider" contained within the tank. This collider is very low in height (3 cm) and placed on the ground under the tank. This requires the user to step on the tank to crush it, rather than just touch it with his foot, in which case he could just walk through the tank to destroy it.

To animate the virtual avatars, users wear a total of 15 motion-capture marker clusters (see section 4.4). The avatars were animated using forward kinematics to reflect the entire-body kinematics as accurately as possible. Because the avatars had different segment proportion, the relative rotations of each body-segment relative to its parent were applied to its corresponding bone in the avatar rig. The pelvis is used as the

root segment and is translated vertically for the feet to lay flat on the ground when the user is standing still. Head tracking was implemented using a combination of inertial sensors and an optical motion capture system (Vicon T20-S). The inertial sensors integrated in the HMD (Oculus Rift CV1) were used for and the optical motion- capture system was used for to measure the orientation of the user's head and the optical system was used to measure its position.

VALIDATION STUDY

Participants

Ten asymptomatic participants, 3 females and 7 males, were recruited for this study. They all reported having no pathology, injury or pain in the lower limbs at the time of testing. The participants had a mean age of 25.7 ± 2.5 years. All participants were right-foot dominant. All participants reported 20-20 or corrected vision and all but one were new to immersive VR. A 15\$ compensation was given for participation in the study, which lasted approximately 90 minutes. Prior approval was obtained from institutional Research Ethics Committees.

Materials

A 12-camera optical system (Vicon T20-S) running Vicon Tracker software was used to animate the avatars, for positional head-tracking and to record lower-limb kinematics at 240Hz. Users walked on an instrumented split- belt AMTI treadmill, allowing for simultaneous recording of ground reaction forces. Rendering of the game was done on a desktop with an Nvidia GeForce GTX 1070, Intel core I7 processor and 12GB of RAM. It is displayed in an Oculus Rift CV1 head mounted device (HMD).

Latency evaluation

Motion-to-photon latency was measured using a 400fps camera (Nikon 1 J4). A user wearing all motion capture markers clapped his hands above his head. The recording was framed to capture the user's real hands and the hand of the avatar, within the city VE, simultaneously. The number of frames between the contact of the physical hands and of the avatar's hands was calculated. Eight trials were performed and the mean number of frames was used as a measure of total system latency. Given that the sequence was recorded at 400 fps and that there was sometimes uncertainty between two different frames for the moment the avatar's hands contacted each other, this method gives an estimation of latency within approximately 5ms.

Procedure

Marker placement and functional calibration

Participants wore a medical treadmill harness (Robertson Harness, Inc.) in order to support their weight if a fall occurred, given that they were visually isolated from their physical environment. A total of 15 marker clusters were fixed to their body segments using Velcro straps (Fig. 2). These segments were: feet (2), shanks (2), thighs (2), hands (2), forearms (2), arms (2), torso and pelvis (2), head (1). Individual markers were fixed over the malleoli (4) and femoral condyles (4) using double-sided tape.

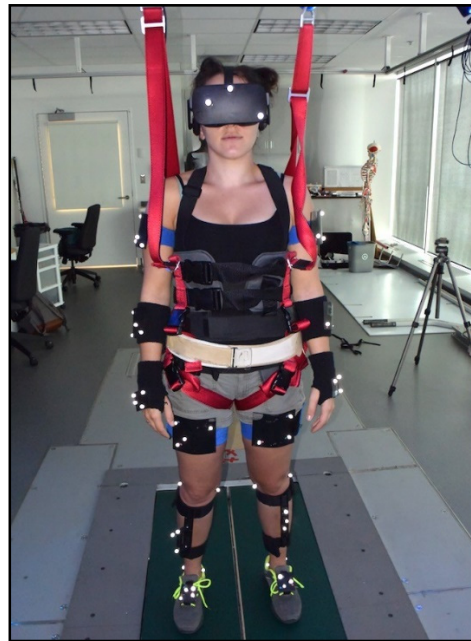


Figure-A I-2 A participant wearing the harness and motion capture markers, on the instrumented treadmill

Next, a functional calibration method consisting of a series of specific movements was applied to define joint centers and functional rotation axes. The first movement is a squat combined with flapping of the arms. During this movement, the feet are maintained parallel using a guide and the user is asked to keep his lower limbs parallel during the full range of motion. The flexion axes of the ankles, knees, hips, shoulder, elbow and wrist are extracted from this movement. The individual markers placed on bony prominences are used to calculate the midpoint of knee and ankle joints. These midpoints are projected upon the functional flexion axes to define the respective joint centers. The second calibration movement is a circumduction of each hip. This is used to find the hip joint center. In the same way, the third movement is a circumduction of shoulder and is used

to estimate the shoulder joint center. Finally, a T-pose is used to fix the neutral position of the joints. The coordinate system (CS) of each segment of the extremities is then defined as:

- **x axis:** functional rotation axis of the proximal joint,
- **z axis:** along the anatomically-based longitudinal axis,
- **y axis:** cross-product of x and z axes.

Study procedure

The participants were asked to walk on the treadmill at a self- selected comfortable pace for eight minutes without any VR. This treadmill training phase allows participants to habituate to treadmill walking and limits the initial variability of gait in infrequent treadmill users. The speed was initially set to 1.0 m/s for all participants and they verbally instructed the experimenter to increase or decrease the speed in increments of 0.1 m/s until they felt they were walking at a natural pace.

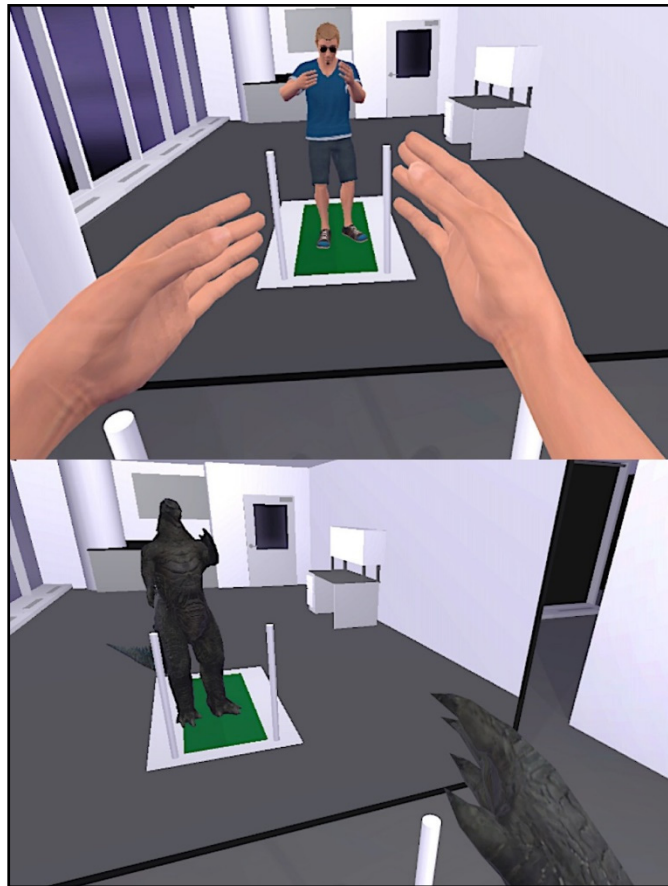


Figure-A I-3 A participant viewing his self-avatar in the virtual mirror while embodying a human (top) and a monster (bottom)

After the training phase, the treadmill was stopped and participants positioned the HMD in front of their eyes. The participants were randomly assigned to begin the experimentation with either the Godzilla-like avatar or similarly-scaled human avatar (male for all participants). A VE that is a replica of the laboratory in which the study was being conducted was displayed in the HMD, with an eight- foot virtual mirror placed in front of the participant. They were instructed to move their upper and lower limbs and

observe their self-avatar by looking down at their body and through the virtual mirror. This step lasted 4 minutes and served a double purpose. The first objective was to create a feeling of embodiment of the avatar through the visuomotor synchronization. The second was to allow the user time to “play around” with his avatar so that he would focus on the walking and foot placement task in the second phase. In previous studies, we have found that without this period, many participants are distracted and testing the animation of their avatar during the experimentation.

Participants were then instructed to close their eyes while the VE was changed. When they opened their eyes, the urban city VE was displayed. As the treadmill was started and gradually accelerated, participants started walking in the virtual environment. There was an initial five-minute game training phase for the participants to get used to walking on the treadmill while visually immersed and with the specific virtual avatar that was displayed. A comfortable pace for walking in the immersive VE was established in the same manner as in the treadmill training phase. The game-training phase consisted of 5 minutes of normal walking while embodying the avatar. The participants then transitioned into the gait and foot placement phase where they started encountering tanks at random intervals and positions on their path, as described in section 3.2. After each 30-second period encountering tanks, there was 30-second period without any tank where the participants walked normally. They were instructed to crush all the tanks on the street by stepping on them with either one of their feet. When they successfully crushed a tank, an explosion animation was displayed as visual confirmation. After this game training phase, the users transitioned into the actual experimental trial which was a four-minute replica of the habituation phase, again starting with x seconds of walking without tanks.

Participants were then afforded a 15-minute rest period where they removed the HMD.

During this period, they were asked to answer a questionnaire regarding their perceived presence and embodiment as well as a second questionnaire about their level of discomfort and cybersickness. Finally, they were also asked to estimate how long they had just spent walking in the VE and to give an appreciation of the experience with the avatar they had just embodied. After the rest period, the participants repeated all the phases from the habituation with a virtual mirror, with the second avatar this time. Fig. 4 shows the different steps involved in the entire experimental protocol.

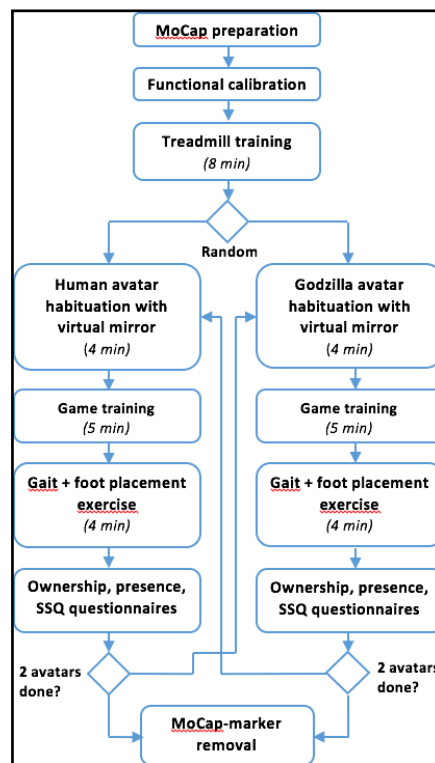


Figure-A I-4 Study procedure

Measurements and data analysis

Lower limb kinematics and kinetics were recorded during the gait and foot placement exercise for each of the conditions. During each of these conditions, a 30-second recording was taken when the participant was walking without any tanks present and another 30-second recording was taken at the end of the period where the participant was crushing tanks. The flexion/extension rotations were computed for the knee and hip joints, using the method described by Grood and Suntay [24]. The data were then divided into distinct gait cycles using foot-ground contact as the cut off point, and each cycle was normalized to 100 sample points representing 100% of the gait cycle. Vertical ground reaction forces were also extracted and normalized across the entire gait cycle.

For each gait cycle of the recordings without tanks, the following values were extracted from the flexion/extension data of each joint.

- value at heel strike,
- value at toe-off,
- maximum value.

Step length and cadence were also calculated for all gait trials.

For recordings during the tank-crushing sequence, the individual steps used to crush tanks were isolated. The maximum knee and hip flexion values and the maximum vertical ground force on the side of the limb that crushed the tank were extracted for statistical analysis.

Subjective measurements

Immediately following the completion of the task in a given condition, participants answered the Presence Questionnaire [25] and the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) and the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [26]. They were also asked to rate the following statements from 1 (totally disagree) to 7 (totally agree) to evaluate their sense of embodiment:

1. “I felt as if the virtual body was my actual body”
2. “The movements of the virtual body were caused by my movements”
3. “The movements of the virtual body corresponded to my movements, in real-time”

They were also asked to estimate how much time they had just spent in the given condition and how enjoyable the task was to them, on a scale from 1 to 7 (they were also asked these two questions right after the 8-minute treadmill training phase).

Data analysis

All the aforementioned data were compared between the “human avatar” (HA) and “Godzilla avatar” (GA) conditions. Given the number of subjects and inter-subject variability of kinematic data, descriptive statistics were used. The conditions are compared in terms of average values and standard deviations.

RESULTS

Motion to photon latency

The average motion-to-photon latency in the system, over 8 trials, was found to be 78 ms or 31.2 frames at 400 fps. Question 14 of the Presence Questionnaire asks users to

subjectively evaluate the perceived delay between their actions the corresponding consequences. The mean scores for HA and GA were both 1.44/7, with the minimum possible score being 1.

Gait kinetics and spatiotemporal measures

The average self-selected comfortable pace was 1.03 ± 0.02 m/s when walking on the treadmill without an HMD and 0.97 ± 0.04 m/s when immersed in the VE.

During normal gait (without tanks), participants walked with less maximum hip flexion in the GA condition ($6.8 \pm 4.9^\circ$) than in the HA condition ($9.1 \pm 4.9^\circ$). Fig. 5 shows the mean hip flexion curve for both conditions. This was also reflected in a shorter step length (51.0 ± 4.0 cm) and higher cadence (51.9 ± 3.2 steps/min) in the GA condition, compared to HA condition (52.0 ± 3.3 cm and 51.0 ± 1.7 steps/min).

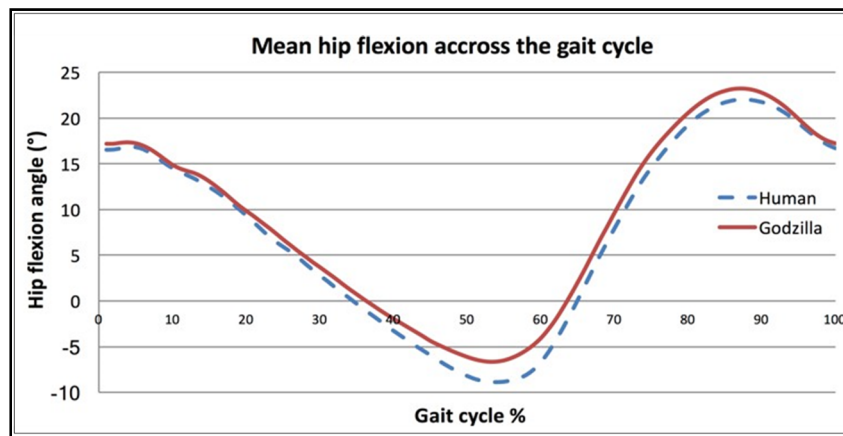


Figure-A I-5 The mean hip flexion curve across the entire gait cycle with a human avatar (HA) and Godzilla avatar (GA)

Tank crushing

During steps where they were crushing a tank, participants had lower maximum knee flexion in the GA condition ($66.8 \pm 7.2^\circ$) than they did in the HA condition ($69.1 \pm 11.8^\circ$). Maximum hip flexion was similar for GA ($27.1 \pm 9.1^\circ$) and HA conditions ($27.7 \pm 8.9^\circ$). Vertical ground reaction forces for tank crushes were slightly higher in GA ($1138.6 \pm 313.5\text{N}$) than HA ($1127.6 \pm 283.8\text{N}$) condition.

Presence and embodiment

Results of the Presence Questionnaire were similar for all questions between the human and Godzilla conditions. Table A I-1 shows the scores for the different categories of the questionnaire.

Tableau-A I-1 Mean scores and SD for the categories of the Presence Questionnaire for the HA and GA conditions (scale from 1 to 7)

Category	Human (HA)	Godzilla (GA)
Realism	5.1 ± 1.3	5.6 ± 0.8
Possibility to act	5.8 ± 1.3	6.1 ± 1.0
Interface quality*	1.5 ± 0.5	1.8 ± 0.8
Self-evaluated performance	6.2 ± 0.7	5.8 ± 1.1

*For Interface quality, a lower score is better

In the questions related to embodiment, results were almost identical for both avatar conditions, in all three questions. The mean scores for question 1 were 5.7 ± 1.6 and 5.7 ± 0.8 for the human and Godzilla avatars, respectively. For question 2, the scores were

6.7 ± 0.5 (HA) and 6.6 ± 0.5 (GA) and for question 3 they were 6.6 ± 0.5 (HA) and 6.5 ± 0.5 (GA).

Subjective appreciation

Simulator sickness, as reported with the SSQ questionnaire was not significantly different between avatars. After completing the gait and foot placement exercises with the human and Godzilla avatars, the mean SSQ scores were 2.7/48 (± 2.6) and 2.1/48 (± 2.0), respectively.

Table A I-2 shows the time the participants actually spent in each condition compared to the length of time they estimated that they had spent.

Tableau-A I-2 Time spent in the experimental condition and time subjectively estimated by the participants, for each condition

Condition	Time spent (min)	Time estimated (min)	Estimation error
No avatar	8	8.2 ± 3.2	+3%
Human (HA)	13	11.2 ± 3.1	-14%
Godzilla (GA)	13	9.0 ± 2.4	-31%

To the subjective question of how much they appreciated the given task, participants gave the highest score to the GA condition (6.2 ± 1.0), followed by the HA condition (5.1 ± 1.4) and the initial condition where they walked without a VE (4.2 ± 1.0).

DISCUSSION

The purpose of this study was to explore the effect of embodying different virtual avatars on lower limb kinematics and on user appreciation. To do this, we compared embodiment of a realistic looking human avatar and a Godzilla-like monster avatar. Results show clear trends for shorter step lengths during gait and less knee flexion when crushing virtual tanks when embodying the Godzilla avatar. Participants also reported enjoying embodying the Godzilla avatar (GA) more than the human avatar (HA) and time was perceived to pass faster in this condition as well.

On average, when embodying a GA, participants took steps that were a little shorter, with a cadence that was a little higher. They also didn't go as far in hip extension as they did in the HA condition. While these differences remain relatively small from a clinical perspective, they do show a clear trend. Different factors could explain this trend. First, as described in section 3.2, the relative proportions of the avatars' segments differ. The lower limbs of the GA are 10% shorter than those of the HA. Shorter step lengths may then have been an adaptation to their perceived shorter leg length during the GA condition. It is also possible that participants interpreted that a GA would normally walk with smaller, quicker steps and they were adjusting their behaviour to match that of their self-avatar. Of course, to fairly compare the effects of these two avatars on movement, they should have the same proportions, joint range, tracking marker mappings (i.e. retargeting). Otherwise, a movement in a monster avatar may produce different visual movement feedback than the human avatar. On the other hand, enforcing these avatar similarities may make the monster appear to be less monster-like, which could also ultimately impact user behaviour. Thus, for this study we opted to keep the monster proportions to be more monster-like. In future studies, we will explore other parameters, such as avatar

proportions. It is worth noting that shorter step length and higher cadence are not necessarily a desired outcome and such changes have actually been said to reflect worse gait quality. Nevertheless, these changes support the possibility that the form and/or proportions of an avatar could be used to manipulate a user's gait and this could presumably be used in the opposite direction (longer virtual lower-limbs to produce longer step lengths).

In performing the task of crushing tanks, we had hypothesized that participants would instinctively behave like their avatar and that the GA would lead to movements of larger amplitude and higher ground reaction forces. In fact, hip flexion was similar for both conditions but participants kept their leg a little more extended with the GA. In doing so, they were lifting their foot a little higher off the ground. Again, it is difficult to distinguish if this is a behavioral change to match the avatar or if it is caused by the different proportions of the lower limbs of the GA, whose thighs are shorter than his shanks. This could be a sign of the participants feeling less confidence in their foot-placement control in the GA condition and thus raising their foot higher to make sure they stop atop the tanks. This is not however supported by the Presence Questionnaire results, which were similar for both avatars. Participants did produce slightly higher ground reaction force in the GA condition but the difference is only equal to approximately 1% of the recorded forces.

The results of the subjective measurements support our hypothesis that embodying the GA would be more enjoyable to participants. Indeed, participants rated the experience as being 16% (1.1/7) more enjoyable, even though they performed the exact same tasks in both conditions. Interestingly, participants underestimated the time they spent embodying the GA by 31%, compared to a 14% underestimation with the HA. Without the avatar, participants slightly overestimated the time spent walking on the treadmill. The

comparison with the no-avatar condition is imperfect as there was no other task than to walk in that condition, as opposed to the HA and GA conditions where there were periods of tank crushing tasks. However, the GA and HA are identical except for the avatar that was embodied and show a large difference in the perception of time. This is, to our knowledge, the first study to report results relating to the perception of time with relation to avatar embodiment. The subjective appreciation and time-estimation results indicate that embodying more novel virtual avatars may make physical therapy more fun and go by faster, thus improving motivation and compliance with physical rehabilitation programs. Studies over several sessions will be needed to verify if the effect subsides as the novelty of the avatar embodiment wears off.

This study is of course limited by the small number of participant and the resulting descriptive nature of data analysis. Further studies will be needed to confirm the observations in this study and to identify the root cause of these changes.

CONCLUSION

In conclusion, this study showed that embodying different avatars does have an impact on lower limb kinematics of gait and foot placement. Whether these changes are related to the relative proportion of the avatar's segments needs further investigation. Our results also show that embodying a more novel avatar can make gait training more enjoyable and seem less time-consuming. It could therefore be an interesting tool in maintaining motivation. Future work will study the effect of different avatar proportions on movement and the effect of embodiment on time perception.

ACKNOWLEDGMENTS

Authors wish to thank Gerald Parent for his extensive assistance during experimentations and data analysis.

REFERENCES

- E. Kokkinara and M. Slater, “Measuring the effects through time of the influence of visuomotor and visuotactile synchronous stimulation on a virtual body ownership illusion,” *Perception*, vol. 43, no. 1, pp. 43–58, 2014. [1]
- T. C. Peck, S. Seinfeld, S. M. Aglioti, and M. Slater, “Putting yourself in the skin of a black avatar reduces implicit racial bias,” *Conscious. Cogn.*, vol. 22, no. 3, pp. 779787, 2013. [2]
- G. J. Barton, A. R. De Asha, E. C. P. van Loon, T. Geijtenbeek, and M. A. Robinson, “Manipulation of visual biofeedback during gait with a time delayed adaptive Virtual Mirror Box,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, 2014. [3]
- S. Saint-Pierre Cote, P. Charbonneau, M. Dallaire, R. Aissaoui, S. Nadeau, C. Duclos, and D. Labbe, “Feasibility of Using Modulated Real-Time Self-Avatars to Induce Asymmetric Kinematic Changes During Gait,” in *Digital Human Modelling 2016*, 2016, pp. 1–5. [4]
- M. Botvinick and J. Cohen, “Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see,” *Nature*, vol. 391, no. 6669, p. 756, 1998. [5]
- V. I. Petkova and H. H. Ehrsson, “If I were you: Perceptual illusion of body swapping,” *PLoS One*, vol. 3, no. 12, 2008. [6]
- M. Slater, B. Spanlang, M. V. Sanchez-Vives, and O. Blanke, “First person experience of body transfer in virtual reality,” *PLoS One*, vol. 5, no. 5, 2010. [7]

- A. L. Baylor, "Promoting motivation with virtual agents and avatars: role of visual presence and appearance.," *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, vol. 364, no.1535, pp. 3559–65, 2009. [8]
- N. Yee, J. N. Bailenson, and N. Ducheneaut, "The Proteus Effect Implications of Transformed Digital Self- Representation on Online and Offline Behavior," *Communic. Res.*, vol. 36, no. 2, pp. 285–312, 2009. [9]
- K. Kilteni, I. Bergstrom, and M. Slater, "Drumming in immersive virtual reality: the body shapes the way we play," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 19, no.4, pp. 597–605, 2013. [10]
- D. Banakou, R. Groten, and M. Slater, "Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes.," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 110, no. 31, pp. 12846–51, 2013. [11]
- H. E. Hershfield, D. G. Goldstein, W. F. Sharpe, J. Fox, L. Yeykelis, L. L. Carstensen, and J. N. Bailenson, "Increasing Saving Behavior Through Age Progressed Renderings of the Future Self.," *J. Mark. Res.*, vol. 48, no. November, pp. S23–S37, 2011. [12]
- S. J. Ahn, "Embodied Experiences in Immersive Virtual Environments: Effects on Pro-Environmental Attitude and Behavior," *Diss. Univ.*, no. May, pp. 1–156, 2011. [13]
- N. Yee and J. Bailenson, "The proteus effect: The effect of transformed self representation on behavior," *Hum. Commun. Res.*, vol. 33, no. 3, pp. 271–290, 2007. [14]
- J. Pena, J. T. Hancock, and N. a. Merola, "The Priming Effects of Avatars in Virtual Settings," *Communic. Res.*, vol. 36, no. 6, pp. 838–856, 2009. [15]
- P. Barr, R. Khaled, J. Noble, and R. Biddle, "Well-Being to ' Well Done !': The Development Cycle in Role- Playing Games," *Proc. First Int. Conf. Persuas. Technol. Hum. well-being*, pp. 96–99, 2006. [16]

- R. Khaled, P. Barr, J. Noble, R. Fischer, and R. Biddle, "Fine tuning the persuasion in persuasive games," *Persuas. Technol.*, vol. 4744, pp. 36–47, 2007. [17]
- S. V. Adamovich, G. G. Fluet, E. Tunik, and A. S. Merians, "Sensorimotor Training in Virtual Reality: A Review," vol. 25, no. 1, pp. 1–21, 2010. [18]
- H. Sveistrup, "Motor rehabilitation using virtual reality," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 1, no. 1, p. 10, 2004. [19]
- K. Eng, E. Siekierka, P. Pyk, E. Chevrier, Y. Hauser, M. Cameirao, L. Holper, K. Hägni, L. Zimmerli, A. Duff, C. Schuster, C. Bassetti, P. Verschure, and D. Kiper, "Interactive visuo-motor therapy system for stroke rehabilitation," *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 45, no. 9, pp. 901–907, 2007. [20]
- A. L. Betker, A. Desai, C. Nett, N. Kapadia, and T. Szturm, "Game-based exercises for dynamic short-sitting balance rehabilitation of people with chronic spinal cord and traumatic brain injuries.," *Phys. Ther.*, vol. 87, no. 10, pp. 1389–98, 2007. [21]
- M. C. Verdonck and S. Ryan, "Mainstream technology as an occupational therapy tool: Technophobe or technogeek?," *Br. J. Occup. Ther.*, vol. 71, no. 6, pp. 253–256, 2008. [22]
- S. Shahnewaz, I. Afarat, T. Irfan, G. Samaraweera, M. Dallaire-côté, D. R. Labbe, and J. Quarles, "Gaitzilla : A Game to Study the Effects of Virtual Embodiment in Gait Rehabilitation," in *IEEE 3D User Interfaces*, 2016, pp. 263–264. [23]
- E. S. Grood and W. J. Suntay, "A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: application to the knee.," *J. Biomech. Eng.*, vol. 105, no. 2, pp. 136–44, 1983. [24]

B. G. Witmer and M. J. Singer, "Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire," *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, vol. 7, no. 3, pp. 225-240, 1998. [25]

G. J. Kennedy, S. P. Tripathy, and B. T. Barrett, "Early age-related decline in the effective number of trajectories tracked in adult human vision," *J. Vis.*, vol. 9, no. 2, 2009. [26]

ANNEXE II

EVALUATING THE IMPACT OF A VIRTUAL SELF-AVATAR ON SPATIOTEMPORAL GAIT PARAMETERS

P, Charbonneau ^a, M. Chitour ^a, T, Robert ^b,
S. Saint-Pierre Cote ^a, R. Aissaoui ^a, D. Labbe ^a

^a Laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie, École de Technologie Supérieure,
1100 rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^b Université de Lyon, Lbmc — IFSTTAR, Site de Lyon-Bron Case 24,
25 Avenue François Mitterrand, Lyon, 69675 Bron Cedex, France

Présenté à 23rd Annual CyberPsychology, CyberTherapy & Social Networking Conference
(CyberPsy), Montréal, Canada, juin 2018.

ABSTRACT

The study of gait and its rehabilitation has of frequently been done using a treadmill rather than over-ground walking because of space constraints and the requirements of motion capture technologies. It has generally been recognized that some kinematics and temporal differences exist between treadmill and overground walking. These differences may be in part due to the stationary nature of treadmill walking, leading to an absence of optical flow. To compensate for this absence, different studies have explored the use of immersive virtual reality (VR), so that the user sees himself walking through a virtual environment (VE). Immersive VR, using a head-mounted display (HMD), prevents a user from seeing his own body in the virtual environment. Recently, studies have used embodiment of real-time self-avatars as a method to provide a user with visual feedback of his movements in gait rehabilitation. To our knowledge, no study has measured the impact of embodying a self-avatar, which inevitably has some system latency, on gait patterns. Methodology: In this study, we quantified the spatiotemporal gait parameters of 11 healthy participants in 6 different conditions. In the 1st condition, participants walked overground in a 50-meter long hallway. In the 2nd condition, they walked on a treadmill at a self-selected comfortable pace, without any VR feedback. In the 3rd

condition, they walked on the treadmill while viewing a VE through an HMD. The VE was a replica of the physical laboratory the participants were in and they were not moving this VE (as if they were walking on a virtual treadmill). In the 4th and 5th conditions which were presented in randomized order, the participants walked in a virtual hallway, which was the replica of the physical hallway from condition 1, with (condition 4) and without a real-time self- avatar (condition 5). Through all conditions, participants wore inertial sensors (XSens) on their pelvis and lower limbs. Prior to the walking trial, they performed a series of calibration movements. Mean cadence, step length, gait cycle duration and step width were computed for each participant and for each condition. Between each condition with VR, participants answered a simulator sickness questionnaire (SSQ) and a presence questionnaire. Conditions were compared using paired T-Tests. RESULTS: When comparing the overground condition to the treadmill without visual feedback, results are in accordance with previous literature: participants have a smaller step length, higher step width, slower cadence and a longer gait cycle duration on the treadmill. Viewing a virtual replica of the laboratory through an HMD did not lead to any significant changes in the studied gait parameters. Viewing the dynamic VE where participants walked along a virtual corridor also did not result in any significant changes, compared with treadmill gait without visual feedback. The addition of the real-time self-avatar led to significant differences in cadence and gait cycle duration. In fact, the participants had a reduced cadence and a longer gait cycle duration even though they walked at the same speed in both conditions. Conclusion: The results found in this study show that there is a potential difference and impact on gait when a user walks with a self-avatar compared to when he does not have one. The next step will be to examine the kinematic data collected during the experiment to obtain more information about the impact of the self-avatar on gait.

Keywords: Virtual reality, Self-Avatar, Gait rehabilitation

ANNEXE III

EVALUATION OF THE IMPACT OF A VIRTUAL SELF-AVATAR ON GAIT PARAMETERS

P, Charbonneau ^a, M. Chitour ^a, T, Robert ^b,
S. Saint-Pierre Cote ^a, R. Aissaoui ^a, D. Labbe ^a

^a Laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie, École de Technologie Supérieure,
1100 rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^b Université de Lyon, Lbmc — IFSTTAR, Site de Lyon-Bron Case 24,
25 Avenue François Mitterrand, Lyon, 69675 Bron Cedex, France

Présenté à International society of physical and rehabilitation medicine, Paris, France,
juillet 2018

ABSTRACT

Studies in the field of gait rehabilitation frequently use treadmills rather than over-ground walking, in part because treadmills require less space and allow for the capture of multiple gait cycles within a limited motion capture volume. Walking on a treadmill alters some kinematic and spatiotemporal parameters, which may be in part a result of the absence of optical flow. To overcome this limitation, some studies have used immersive virtual environments (VEs) to create an optical flow during treadmill gait. Using a head-mounted device, this has the effect of also hiding a user's body from himself. A real-time representation of the user can be displayed in the VEs, in the form of an animated self-avatar. Little is known on the effect of viewing one's self-avatar on gait patterns. This study aims to quantify the differences between walking in a VE with and without a real-time self-avatar. Material and Method Eleven healthy participants walked in 3 different conditions. in the 1° condition, participants walked over-ground in a hallway. In the 2° and 3° conditions (randomized), participants walked in a virtual replica of the hallway, respectively with and without a real-time self-avatar. Through all conditions, participants wore inertial sensors on their pelvis and lower limbs. Participants' mean cadence and gait cycle duration were computed for each condition. Conditions were

compared using paired t-tests. Results: The 2" and 3 conditions were compared. The addition of the self-avatar significantly reduced cadence (-1.9 step/min) and lead to a longer gait cycle duration (+0.04 sec), even though they walked at the same speed on the treadmill. Conclusion These results show that the addition of a self-avatar alters spatiotemporal gait patterns. Different potential explanations for these changes will be discussed. Future work will include analysis of the kinematic data for all conditions.

Keywords: Virtual reality, Self-Avatar, Gait rehabilitation

ANNEXE IV

QUESTIONNAIRE SUR LES JEUX VIDÉO

Questionnaire sur les jeux vidéo



LIO
laboratoire de recherche
en ergonomie et orthopédie

CRCHUM
CENTRE DE RECHERCHE

Questionnaire sur les jeux vidéo

Projet : Conception et développement d'un outil d'entraînement virtuel pour réduire l'asymétrie de la marche suite à un accident vasculaire cérébral (AVC)

No du participant : _____

Nous sommes intéressés à connaître la fréquence à laquelle vous jouez aux jeux vidéo ainsi que la nature des jeux auxquels vous jouez. Ceci nous permettra d'évaluer si ceux-ci ont un lien avec le comportement dans un environnement virtuel.

Veuillez indiquer les six jeux vidéo auxquels vous avez joué le plus souvent durant la dernière année. Nous voudrions connaître le nom du jeu, la durée typique d'une séance de jeu, le nombre de séances à l'intérieur d'un mois, la console sur laquelle vous jouez et si vous utilisez un casque de réalité virtuelle (Oculus, GearVR, etc.). Seuls les jeux auxquels vous avez joué au cours de la dernière année doivent être compilés.

Dans le cas où vous ne jouez à aucun jeu vidéo, vous n'avez qu'à l'indiquer dans le tableau ci-dessous. Ceci ne constitue pas un critère d'exclusion pour la participation à l'étude.

	Nom du jeu	Nombre d'heures / séance	Nombre de séances / mois	Console utilisée	<u>Casque de réalité virtuelle?</u>
1					
2					
3					
4					
5					
6					

5. Dans quelle mesure les mécanismes permettant votre mouvement dans l'environnement vous semblaient-ils naturels?

EXTRÊMEMENT			À MI-CHEMIN			COMPLÈTEMENT
ARTIFICIELS						NATURELS

6. Dans quelle mesure vos sens étaient-ils trompés par le réalisme du mouvement des objets à travers l'espace?

PAS DU TOUT			MODÉRÉMENT			TRÈS
			TROMPÉS			TROMPÉS

7. Dans quelle mesure les expériences que vous avez vécues dans l'environnement virtuel ressemblaient-elles à celles de l'environnement réel ?

PAS			MODÉRÉMENT			TRÈS
RESSEMBLANT			RESSEMBLANT			RESSEMBLANT

8. Étiez-vous capable d'anticiper les conséquences des mouvements que vous faisiez?

PAS DU TOUT			ASSEZ			COMPLÈTEMENT

9. Jusqu'à quel point étiez-vous en mesure d'explorer activement l'environnement de façon visuelle?

PAS DU TOUT			ASSEZ			COMPLÈTEMENT

10. Jusqu'à quel point la sensation de déplacement à l'intérieur de l'environnement virtuel était-elle confondante (réaliste)?

PAS			MODÉRÉMENT			TRÈS
CONFONDANTE			CONFONDANTE			CONFONDANTE

11. À quelle distance pouviez-vous examiner les objets?

PAS PROCHE			PLUTÔT			TRÈS
DU TOUT			PROCHE			PROCHE

12. Jusqu'à quel point pouviez-vous examiner les objets sous différents angles?

PAS DU TOUT			ASSEZ			COMPLÈTEMENT

13. Jusqu'à quel point étiez-vous impliqué(e) dans l'expérience vécue dans l'environnement virtuel?

PAS DU TOUT			MOYENNEMENT			COMPLÈTEMENT
ENGAGÉ(E)			ENGAGÉ(E)			ABSORBÉ(E)

14. Jusqu'à quel point avez-vous ressenti un délai séparant vos actions de leurs conséquences?

AUCUN			DÉLAI			LONG
DÉLAI			MODÉRÉ			DÉLAI

15. À quel rythme vous êtes-vous adapté(e) à l'expérience vécue dans l'environnement virtuel?

PAS ADAPTÉ(E)			LENTEMENT			EN MOINS
DU TOUT						D'UNE MINUTE

16. En termes d'interactions et de déplacements dans l'environnement virtuel, jusqu'à quel point vous sentiez-vous compétent(e) à la fin de l'expérience?

PAS			RAISONNABLEMENT			TRÈS
COMPÉTENT(E)			COMPÉTENT(E)			COMPÉTENT(E)

17. Jusqu'à quel point la qualité visuelle de l'appareillage graphique vous a-t-elle incommodé(e) dans l'exécution des tâches requises?

PAS DU TOUT		ASSEZ			TÂCHES	
		INCOMMODÉ(E)		COMPLÈTEMENT	EMPÊCHÉES	

18. Dans quelle mesure les mécanismes de contrôle de votre mouvement ont-ils interféré avec l'exécution des tâches requises?

PAS DU TOUT		ASSEZ			GRANDEMENT	
		INTERFÉRÉ			INTERFÉRÉ	

19. Jusqu'à quel point êtes-vous parvenu(e) à vous concentrer sur les tâches requises plutôt que sur les mécanismes utilisés pour effectuer lesdites tâches?

PAS DU TOUT		ASSEZ			COMPLÈTEMENT	

RÉPONDEZ SI L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL COMPRENAIT DES SONS :

20. Dans quelle mesure les aspects auditifs de l'environnement vous invitaient-ils à vous y impliquer?

PAS DU TOUT		ASSEZ			COMPLÈTEMENT	

21. Dans quelle mesure arriviez-vous à identifier correctement les sons produits dans l'environnement?

PAS DU TOUT		ASSEZ			COMPLÈTEMENT	

22. Dans quelle mesure arriviez-vous à localiser correctement les sons produits dans l'environnement?

PAS DU TOUT		ASSEZ			COMPLÈTEMENT	

RÉPONDEZ SI L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL COMPRENAIT DES ASPECTS HAPTIQUE (TOUCHER) :

23. Dans quelle mesure pouviez-vous explorer activement et de façon tactile (par le toucher) l'environnement?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

24. Jusqu'à quel point pouviez-vous déplacer ou manipuler les objets dans l'environnement virtuel?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

Questionnaire sur l'État de Présence (QÉP)

Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO

Validation :

- 101 participants ont rempli le questionnaire suite une immersion virtuelle;
- Les analyses factorielles ont été effectuées en composantes principales et avec des rotations varimax;
- Des corrélations inter-items ont été effectuées;
- Alpha de Cronbach = .84
- Maintenant 19 items (pour les EV sans sons/toucher) et 24 items (pour les EV avec sons/toucher)

Cotation :

Total : Items 1 à 19, sur une échelle de 1 à 7.

- Sous-échelle « Réalisme » : Items 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 10 + 13
- Sous-échelle « Possibilité d'agir » : Items 1 + 2 + 8 + 9
- Sous-échelle « Qualité de l'interface » : Items (tous inversés) 14 + 17 + 18
- Sous-échelle « Possibilité d'examiner » : Items 11 + 12 + 19
- Sous-échelle « Auto-évaluation de la performance » : Items 15 + 16
- Sous-échelle « Auditif* » : Items 20 + 21 + 22
- Sous-échelle « Haptique* » : Items 23 + 24

* NOTE : Les sous-échelles « *haptique* » et « *auditif* » ne font pas partie de l'analyse factorielle. Les items peuvent être compilés si l'environnement virtuel contient des sons ou la possibilité de voir son corps ou de toucher des objets. Par contre, les items de la sous-échelle « *résolution* » de Witmer & Singer font maintenant partie de nos analyses.

Normes :

	Moyenne	Écart type
Total	104.39	18.99
Sous-échelle « Réalisme »	29.45	12.04
Sous-échelle « Possibilité d'agir »	20.76	6.01
Sous-échelle « Qualité de l'interface »	15.37	5.15
Sous-échelle « Possibilité d'examiner »	15.38	4.90
Sous-échelle « Auto-évaluation de la performance »	11.00	2.87

Dernière version: Mars 2013

Version originale : Witmer, B.G. & Singer, M.J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225-240. Structure factorielle révisée: Witmer, B.J., Jerome, C.J., & Singer, M.J. (2005). The factor structure of the Presence Questionnaire. *Presence*, 14(3) 298-312.

ANNEXE VI

QUESTIONNAIRE SUR LES CYBERMALAISES

ANNEXE VI

Questionnaire sur les cybermalaises



Questionnaire sur les cybermalaises*

Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO
(Traduit de Kennedy, R.S. et al., 1993)

Numéro _____ Date _____

Consignes : Encerclez à quel point chaque symptôme ci-dessous vous affecte présentement.

1. Inconfort général	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
2. Fatigue	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
3. Mal de tête	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
4. Fatigue des yeux	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
5. Difficulté à faire le focus	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
6. Augmentation de la salivation	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
7. Transpiration	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
8. Nausées	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
9. Difficulté à se concentrer	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
10. Impression de lourdeur dans la tête	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
11. Vision embrouillée	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
12. Étourdissement les yeux ouverts	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
13. Étourdissement les yeux fermés	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
14. *Vertiges	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
15. **Conscience de l'estomac	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>
16. Rots	<u>Pas du tout</u>	<u>Un peu</u>	<u>Modérément</u>	<u>Sévèrement</u>

* Les vertiges sont vécus comme une perte de l'orientation par rapport à la position verticale.

** L'expression « conscience de l'estomac » est habituellement utilisée pour désigner un sentiment d'inconfort sans nausée.

Dernière version : Mars 2013

***Version originale : Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S., & Lilienthal, M.G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220

Questionnaire sur les Cybermalaises

Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO

Cotation de la version canadienne-française du Questionnaire sur les cybermalaises :

- Faire le Total des items 1 à 16 : échelle de 0 (pas du tout) à 3 (sévèrement).
 - Sous-échelle « Nausée » : items 1 + 6 + 7 + 8 + 12 + 13 + 14 + 15 + 16.
 - Sous-échelle « Oculo-moteur » : items 2 + 3 + 4 + 5 + 9 + 10 + 11.

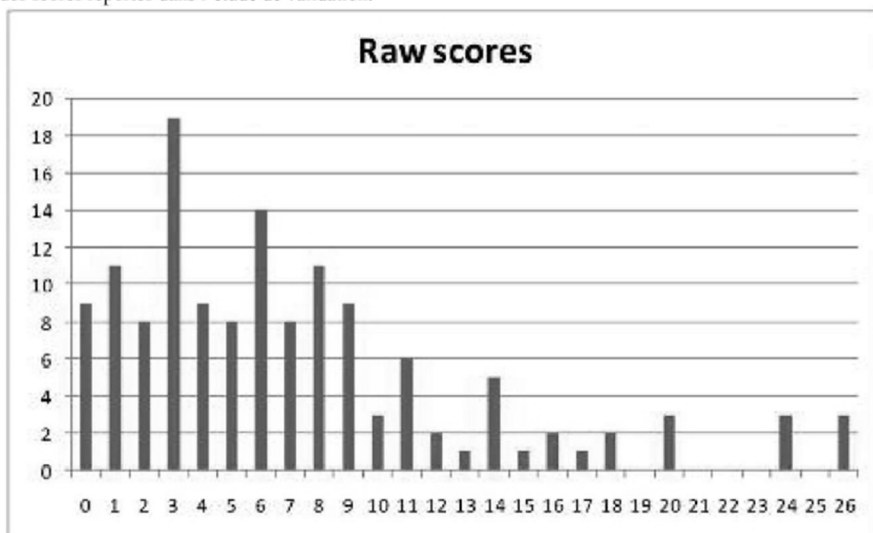
Pour consulter les articles scientifiques sur la validation canadienne-française de ce questionnaire, veuillez-vous référer aux articles suivants :

BOUCHARD, S., Robillard, & Renaud, P. (2007). Revising the factor structure of the Simulator Sickness Questionnaire. Acte de colloque du *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, 5, 117-122.

BOUCHARD, S., St-Jacques, J., Renaud, P., & Wiederhold, B.K. (2009). Side effects of immersions in virtual reality for people suffering from anxiety disorders. *Journal of Cybertherapy and Rehabilitation*, 2(2), 127-137.

BOUCHARD, S., Robillard, G., Renaud, P., & Bernier, F. (2011). Exploring new dimensions in the assessment of virtual reality induced side-effects. *Journal of Computer and Information Technology*, 1(3), 20-32.

Basée sur les résultats de l'étude de Bouchard, St-Jacques, Renaud, & Wiederhold (2009), voici la moyenne des scores reportés dans l'étude de validation:



Note. Pour la cotation et validation de la version originale anglaise, veuillez consulter l'article suivant : Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S., & Lilienthal, M.G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220.

ANNEXE VII

QUESTIONNAIRE SUR L'ÉVALUATION DE L'INCARNATION

Questionnaire sur l'évaluation de l'incarnation



Questionnaire Expérience d'Incarnation de l'Avatar

Projet : Conception et développement d'un outil d'entraînement virtuel pour réduire l'asymétrie de la marche suite à un accident vasculaire cérébral (AVC)

Code recherche : _____
Responsable Acquisition : _____
Lieu : _____
Date : _____ Heure : _____

Consigne : Encercler l'énoncé qui correspond le mieux à votre expérience

J'avais l'impression que la projection de l'avatar était de mon corps

1	2	3	4	5	6	7
Totalement en désaccord	En désaccord	Un peu en désaccord	Ni en accord ni en désaccord	Un peu en accord	En accord	Totalement en accord

Les mouvements de l'avatar étaient causés par mes mouvements

1	2	3	4	5	6	7
Totalement en désaccord	En désaccord	Un peu en désaccord	Ni en accord ni en désaccord	Un peu en accord	En accord	Totalement en accord

Les mouvements de l'avatar correspondaient à mes mouvements en temps réel

1	2	3	4	5	6	7
Totalement en désaccord	En désaccord	Un peu en désaccord	Ni en accord ni en désaccord	Un peu en accord	En accord	Totalement en accord

Notes et commentaires

ANNEXE VIII

QUESTIONNAIRE D'APPRÉCIATION ET D'ÉVALUATION DU TEMPS

Demander l'estimation de la durée de la marche aux participants

1. Baseline : _____ réponse _____
2. VR Humain : _____ réponse _____
3. VR Godzilla : _____ réponse _____

Sur une échelle de 1 à 7 comment qualifieriez-vous votre expérience (Baseline)

Ennuyant			Neutre			Passionnant

Sur une échelle de 1 à 7 comment qualifieriez-vous votre expérience (VR Humain)

Ennuyant			Neutre			Passionnant

Sur une échelle de 1 à 7 comment qualifieriez-vous votre expérience (VR Godzilla)

Ennuyant			Neutre			Passionnant

ANNEXE IX

QUESTIONNAIRE DE RENSEIGNEMENTS PERSONNELS



Questionnaire de renseignements personnels

Projet : Conception et développement d'un outil d'entraînement virtuel pour réduire l'asymétrie de la marche suite à un accident vasculaire cérébral (AVC)

Code recherche : _____
Responsable Acquisition : _____
Lieu : _____
Date : _____ Heure : _____



Renseignements généraux

Taille : _____ Poids : _____ Âge : _____
Jambe dominante : _____
Sexe ☐ Homme ☐ Femme
Souffrez-vous d'une condition susceptible d'affecter votre démarche? ☐ OUI ☐ NON
Souffrez-vous d'une condition susceptible d'affecter votre sens de l'équilibre? ☐ OUI ☐ NON
Présence de douleur ou inconfort au niveau du membre inférieur? ☐ OUI ☐ NON
Souffrez-vous de cinétose (nausées, étourdissement) lors de la pratique de jeux vidéo? ☐ OUI ☐ NON
Avez-vous déjà marché sur un tapis roulant? ☐ OUI ☐ NON
Si oui, vous considérez-vous comme une personne habituée à la marche sur tapis roulant? ☐ OUI ☐ OUI
Grossesse en cours ? ☐ OUI ☐ NON

Notes et commentaires

ANNEXE X

DOCUMENT DE PROTOCOLE ET DE CONSENTEMENT ÉTHIQUE



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'ENTRAÎNEMENT VIRTUEL
POUR RÉDUIRE L'ASYMÉTRIE DE LA MARCHÉ SUITE À UN ACCIDENT
VASCULAIRE CÉRÉBRAL (AVC) : TEST D'IMMERSION

CHERCHEUR PRINCIPAL

- David Labbé, Ing., Ph.D., Professeur-chercheur, École de technologie supérieure (ÉTS)

COLLABORATEUR

- Rachid Aissaoui, Ing., Ph.D., Professeur agrégé, École de technologie supérieure (ÉTS)
- Sylvie Nadeau, Ph.D., Professeure titulaire, Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation, Institut de réadaptation Gingras-Lindsay de Montréal, Université de Montréal

ÉTUDIANT-CHERCHEUR

- Philippe Charbonneau, Ing., Étudiant à la Maîtrise, Génie Technologie de la Santé, ÉTS

ORGANISMES SUBVENTIONNAIRES

Regroupement INTER du Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) ET Conseil de Recherche en Science Naturelles et en Génie (CRSNG).

No. Étude au CÉR CHUM : CE.15.104

No. Étude au CÉR ÉTS : H20150509

PRÉAMBULE

Nous sollicitons votre participation dans le cadre d'un projet de recherche parce que vous ne présentez aucune pathologie particulière (sujet sain). 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.

NATURE ET OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE

Suite à un accident vasculaire cérébral (AVC), des déficits moteurs (mouvements) et/ou sensoriels (sensations) sont observables chez la personne touchée dans la majorité des cas. Ces déficits sont caractérisés par une asymétrie de la marche. La problématique principale est le fait que la correction de l'asymétrie résiste aux interventions actuelles.

Dans cette optique, nous développons un outil d'entraînement virtuel dont la fonction essentielle sera la réduction de l'asymétrie de la marche post-AVC. Dans la phase actuelle du projet, nous voulons vérifier la capacité de modifier légèrement la marche de sujets sains. Les données et informations recueillies lors de cette pré-validation permettront, dans une phase subséquente, de valider l'effet sur des participants hémiparétiques, c'est à dire, des personnes souffrant d'une paralysie partielle des membres d'un côté du corps.

Spécifiquement, votre participation permettra de déterminer :

- Si un avatar temps-réel (un avatar est un personnage virtuel vous personnifiant et qui sera, dans le cas présent, affiché sur une toile de projection et à l'aide d'un casque de réalité virtuelle) qui mime vos mouvements avec certaines modifications entraîne des changements dans votre façon de marcher.
- Si ces changements sont les mêmes que l'avatar soit présenté dans un miroir virtuel ou en immersion dans un casque de réalité virtuelle
- Si l'apparence de l'avatar a une influence sur votre façon de marcher.

Le présent projet propose donc de développer une nouvelle approche tentant de réduire l'asymétrie de la marche en utilisant une nouvelle technique stimulante et innovante en réadaptation, la réalité virtuelle.

NOMBRE DE PARTICIPANTS ET DURÉE DE LA PARTICIPATION

Quarante (40) participants sains prendront part à cette étude. Votre participation durera 90 minutes (1 séance).

NATURE DE LA PARTICIPATION DEMANDÉE

Si vous acceptez de participer au projet et après avoir signé le présent formulaire d'information et de consentement, vous devrez réaliser des tâches motrices (marche) avec un casque de réalité virtuelle. Votre participation se déroulera en une seule séance dans le laboratoire d'analyse biomécanique du Laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie (LIO), situé dans les locaux du Centre de recherche du CHUM.

DÉROULEMENT DU PROJET

Le schéma du déroulement général de la session est présenté à la fin du présent formulaire.

1. Consentement écrit et questionnaires (Durée : 12 minutes)

Suite à la présentation de l'étude, à l'explication du formulaire de consentement et à sa signature, vous devrez répondre à un questionnaire concernant la fréquence à laquelle vous jouez aux jeux vidéo. Cette information vise à déterminer si le fait de jouer aux jeux vidéo pourrait influencer la façon dont vous réagirez lorsque nous modifierons la cinématique de la marche de l'avatar. Vous devrez aussi fournir quelques renseignements personnels, tels que votre taille, votre genre ainsi que quelques questions relatives à votre condition physique. Ces renseignements permettront d'avoir des informations de type anthropologiques et d'évaluer si les critères d'inclusion et d'exclusion sont respectés.

2. Fixation des capteurs et calibration anatomique (Durée : 15 minutes)

Des marqueurs réfléchissants seront ensuite posés sur tout votre corps et quelques mouvements de calibration tels que des flexions du genou ou encore des rotations de bras vous seront demandés. Pour certaines parties du corps, des plaques sur lesquelles plusieurs marqueurs sont posés seront utilisées afin d'accélérer la procédure. Ces plaques seront fixées grâce à des bandes velcro. Les marqueurs individuels seront collés avec du ruban à double face adhésive. La Figure 1 présente le schéma de montage des marqueurs.

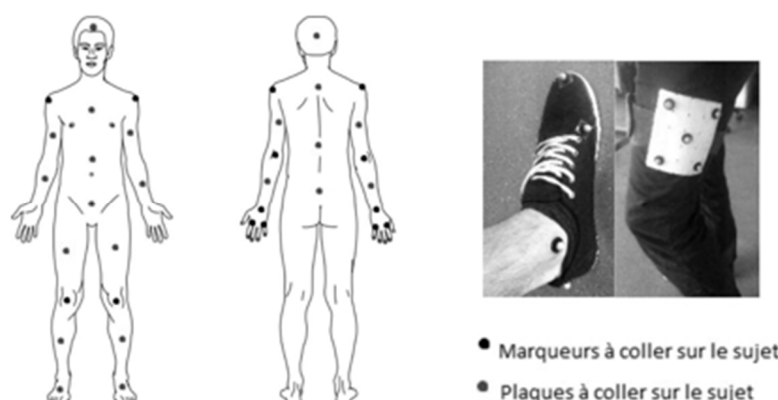


Figure 1 - Schéma de positionnement des marqueurs

S'en suivra une période d'échauffement où vous marcherez sur un tapis roulant positionné devant un écran en 3 dimensions (3D). Pour l'ensemble des expérimentations, vous marcherez sur ce tapis (avec périodes de repos) et porterez des lunettes qui vous permettront de voir en 3D un avatar qui sera projeté sur l'écran. Cet avatar répliquera vos mouvements, parfaitement ou avec certaines modifications, dans un miroir virtuel.

Pendant la période d'échauffement, deux mesures des paramètres de base de votre marche seront prises soit, sans la projection de l'avatar et avec la représentation immersive de l'avatar.

Par la suite, vous aurez à marcher à vitesse confortable sur le tapis roulant en portant le casque de réalité virtuelle pendant 4 périodes d'environ 3 minutes et 20 secondes, entrecoupées de pauses de 2 minutes. À chacune de ces périodes, vous verrez un miroir virtuel vide ou un miroir présentant un avatar qui mime vos mouvements. L'avatar mimera vos mouvements de façon plus ou moins fidèle et sera présenté sous forme d'un humanoïde, selon l'essai en cours. Pendant tous les tests, le mouvement de vos jambes ainsi que les forces que vous appliquerez au sol seront enregistrés et analysés pour mesurer l'effet de l'avatar sur votre mouvement.

Une fois les tests complétés, les capteurs seront retirés et vous devrez compléter un questionnaire sur l'expérience d'incarnation de l'avatar.

Le schéma du déroulement général de la session est présenté à la fin du présent formulaire.

MISE EN BANQUE DE DONNÉES BIOMÉCANIQUES À DES FINS DE RECHERCHE SUR L'ANALYSE MORPHO-FONCTIONNELLE DU SYSTÈME LOCOMOTEUR (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 sur le système locomoteur. Il s'agit d'un volet facultatif. Vous

Conception et développement d'un outil d'entraînement virtuel pour réduire l'asymétrie de la marche suite à un accident vasculaire cérébral (AVC)

pouvez donc refuser que vos données soient mises en banque et participer tout de même à cette étude.

Veuillez prendre connaissance du formulaire de consentement distinct relatif à la mise en banque de données.

PRÉCAUTIONS À PRENDRE ET RESPONSABILITÉS DU PARTICIPANT

En consentant à participer à cette étude, vous acceptez de suivre les consignes de l'étude et de vous soumettre à toutes les évaluations requises dans le cadre de l'étude.

Afin de faciliter l'installation des instruments nécessaires à l'acquisition, il vous sera demandé d'apporter avec vous et de revêtir avant la séance un short de type ~~spandex~~ de préférence, un chandail ajusté au corps et des chaussures de sport (ne couvrant pas les chevilles).

RISQUES ET INCONVÉNIENTS

Pour prévenir les risques de blessures, un échauffement au cours duquel vous pourrez vous familiariser à la marche sur tapis roulant sera effectué. Si au cours de la réalisation d'une tâche, vous éprouvez une quelconque douleur, vous devrez en avvertir le responsable d'acquisition qui mettra fin à la procédure.

Pour prévenir les risques de malaises dus à la visualisation de l'avatar à l'aide du casque de réalité virtuelle, vous devrez indiquer au responsable d'acquisition toute gêne ou tout inconfort qui pourrait survenir lors de la réalisation de différents tests. Le responsable d'acquisition pourra mettre fin à la tâche, voire à votre participation, s'il juge votre inconfort incompatible avec la poursuite du projet.

Pour prévenir les risques de fatigue excessive, des périodes de repos vous seront proposées si vous en ressentez le besoin, ou bien un arrêt complet de l'expérimentation. Des bouteilles d'eau et du sucre seront également mis à votre disposition.

Pour prévenir les risques de chutes lors de la marche sur le tapis avec le port du casque, vous porterez un harnais de sécurité qui est accroché au plafond. Si vous perdez l'équilibre ou éprouvez un inconfort lors de la réalisation de différents tests, vous devrez en avvertir le responsable d'acquisition qui mettra fin à la procédure.

L'effet à court terme, puisque nous ne faisons que modifier le retour visuel de manière ponctuelle, est une possible modification de votre démarche qui reviendra à la normale dès que le retour visuel modifié de vous sera plus présenté. Dans le cadre de ce projet de recherche, la modification de votre démarche n'aura aucun effet à long terme.

RISQUES ASSOCIÉS À LA GROSSESSE

La participation à ce projet ne comporte pas de risques pour la grossesse. Toutefois, nous préférons exclure les participantes dont la grossesse est connue.

Si vous pensez être devenue enceinte durant votre participation à ce projet, vous devrez le signaler immédiatement au chercheur responsable du projet de recherche. Vous serez retirée de l'étude mais la compensation financière pour les séances effectuées vous sera tout de même remise.

AVANTAGES

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

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 les informations contenues dans votre dossier médical, concernant votre état de santé passé et présent, vos habitudes de vie ainsi que les résultats de tous les tests, examens et procédures qui seront réalisés. Votre dossier peut aussi comprendre d'autres renseignements tels que votre nom, votre sexe, votre date de naissance et votre origine ethnique.

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.

Le chercheur responsable de ce projet de recherche fera parvenir à l'organisme subventionnaire ou à ses représentants, les données codées vous concernant.

Les données de recherche codées pourront être transmises par l'organisme subventionnaire à ses partenaires commerciaux. Cependant l'organisme subventionnaire et ses partenaires à l'étranger sont tenus de respecter les règles de confidentialité en vigueur au Québec et au Canada, et ce, quels que soient les pays.

Ces données de recherche seront conservées pendant au moins 25 ans par le chercheur responsable de ce projet de recherche et l'organisme subventionnaire.

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

À des fins de surveillance, de contrôle, de protection, de sécurité et de mise en marché du médicament à l'étude, votre dossier de recherche ainsi que vos dossiers médicaux pourront être consultés par une personne mandatée par des organismes réglementaires, au Canada ou à l'étranger, tel que Santé Canada, ainsi que par des représentants de l'organisme subventionnaire, de l'établissement ou du comité d'éthique de la recherche. Ces personnes et ces organismes adhèrent à une politique de confidentialité.

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

Conception et développement d'un outil d'entraînement virtuel pour réduire l'asymétrie de la marche suite à un accident vasculaire cérébral (AVC)

COMMUNICATION DES RÉSULTATS GÉNÉRAUX

Vous pourrez connaître les résultats généraux de cette étude si vous en faites la demande au chercheur responsable à la fin de l'étude.

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.

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.

COMPENSATION

En guise de compensation pour les frais encourus en raison de votre participation au projet de recherche, vous recevrez 15\$. 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.

EN CAS DE PRÉJUDICE

Si vous deviez subir quelque préjudice que ce soit par suite de toute procédure reliée à ce projet de recherche, 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.

PARTICIPATION VOLONTAIRE ET DROIT 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.

Votre décision de ne pas participer à ce projet de recherche ou de vous en retirer n'aura aucune conséquence sur la qualité des soins et des services auxquels vous avez droit ou sur votre relation avec les équipes qui les dispensent.

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.

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 du projet de recherche, David Labbé, du lundi au vendredi entre 9h et 17h au (514) 396-8526 ou david.labbe@etsmtl.ca.

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) 396-8829.
- le commissaire local aux plaintes et à la qualité des services de l'Hôpital Notre-Dame du CHUM au (514) 890-8000, poste 26047.

CONSENTEMENT

PARTICIPANT(E)

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.

J'accepte d'être filmé(e) durant les tâches qui me seront demandées dans le cadre de cette étude.

OUI	
NON	

Nom (lettres moulées)

Signature

Date (lettres moulées)

SIGNATURE DE LA PERSONNE QUI OBTIENT LE CONSENTEMENT, SI DIFFÉRENTE DU CHERCHEUR RESPONSABLE DU PROJET DE RECHERCHE

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

Nom (lettres moulées)

Signature

Date (lettres moulées)

ENGAGEMENT DU CHERCHEUR RESPONSABLE

Je certifie qu'on a expliqué au/à la participant(e) le 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)

Nom (lettres moulées)

Signature

Date (lettres moulées)

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 ou la participant(e) au cours du processus visant à obtenir le consentement

Nom (lettres moulées)

Signature

Date (lettres moulées)

Veillez noter:

Il faut 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.

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 assureront le suivi.

Conception et développement d'un outil d'entraînement virtuel pour réduire l'asymétrie de la marche suite à un accident vasculaire cérébral (AVC)

ANNEXE 1 – Déroulement de la séance

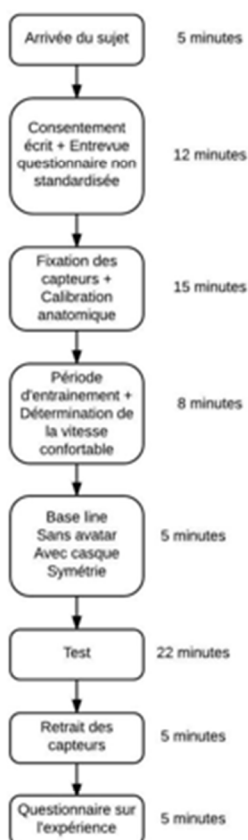


Figure A.1 – Schéma du déroulement de la session

BIBLIOGRAPHIE

- Al-Amri, M., Nicholas, K., Button, K., Sparkes, V., Sheeran, L., & Davies, J. L. (2018). Inertial Measurement Units for Clinical Movement Analysis: Reliability and Concurrent Validity. *Sensors*, 18(3), 719.
- Asai, T. (2016). Agency elicits body-ownership: proprioceptive drift toward a synchronously acting external proxy. *Exp Brain Res*, 234(5), 1163-1174.
- Banakou, D., & Slater, M. (2014). Body ownership causes illusory self-attribution of speaking and influences subsequent real speaking. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(49), 17678-17683.
- Barr, P., Khaled, R., Noble, J., & Biddle, R. (2006). *Feeling Strangely Fine: The Well-Being Economy in Popular Games* (Vol. 3962).
- Baylor, A. L. (2009). Promoting motivation with virtual agents and avatars: role of visual presence and appearance. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1535), 3559-3565.
- Berg, D. v. d. (2017). *Time perception in virtual reality* (Leiden University).
- Betker, A. L., Desai, A., Nett, C., Kapadia, N., & Szturm, T. (2007). Game-based exercises for dynamic short-sitting balance rehabilitation of people with chronic spinal cord and traumatic brain injuries. *Phys Ther*, 87(10), 1389-1398.
- Botella, C., Baños, R., Villa, H., Perpiñá, C., & Garcia-Palacios, A. (2000). *Virtual reality in the treatment of claustrophobic fear: A controlled, multiple-baseline design*.
- Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands "feel" touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), 756-756.
- Boudarham, J., Roche, N., Pradon, D., Bonnyaud, C., Bensmail, D., & Zory, R. (2013). Variations in Kinematics during Clinical Gait Analysis in Stroke Patients. *PLOS ONE*, 8(6), e66421.
- Bruder, G., & Steinicke, F. (2014). Time perception during walking in virtual environments. Dans *2014 IEEE Virtual Reality (VR)* (pp. 67-68).
- Burnfield, J. P. a. J. M. (2010). Gait Analysis: Normal and Pathological Function. *Journal of Sports Science & Medicine*, 9(2), 353-353.

- Castelli, A., Paolini, G., Cereatti, A., & Della Croce, U. (2015). A 2D Markerless Gait Analysis Methodology: Validation on Healthy Subjects. *Comput Math Methods Med*, 2015, 186780.
- Dallaire-Côté, M., Charbonneau, P., Saint-Pierre Côté, S., Aissaoui, R., & Labbe, D. (2016). Animated self-avatars for motor rehabilitation applications that are biomechanically accurate, low-latency and easy to use. Dans *2016 IEEE Virtual Reality (VR)* (pp. 167-168).
- de la Peña, N., Weil, P., Llobera, J., Giannopoulos, E., Pomés, A., Spanlang, B., . . . Slater, M. (2010). *Immersive Journalism: Immersive Virtual Reality for the First-Person Experience of News* (Vol. 19).
- de Rooij, I. J. M., van de Port, I. G. L., & Meijer, J.-W. G. (2016). Effect of Virtual Reality Training on Balance and Gait Ability in Patients With Stroke: Systematic Review and Meta-Analysis. *Phys Ther*, 96(12), 1905-1918.
- E Lateiner, J., & Sainburg, R. (2003). *Differential contributions of vision and proprioception to movement accuracy* (Vol. 151).
- Ferrari, A., Benedetti, M. G., Pavan, E., Frigo, C., Bettinelli, D., Rabuffetti, M., . . . Leardini, A. (2008). Quantitative comparison of five current protocols in gait analysis. *Gait Posture*, 28(2), 207-216.
- Filippeschi, A., Schmitz, N., Miezal, M., Bleser, G., Ruffaldi, E., & Stricker, D. (2017). Survey of Motion Tracking Methods Based on Inertial Sensors: A Focus on Upper Limb Human Motion. *Sensors (Basel)*, 17(6).
- Fox, J., R. Christy, K., & Vang, M. (2014). The experience of presence in persuasive virtual environments. Dans (pp. 164-178).
- Garcia-Palacios, A., Hoffman, H., Carlin, A., Furness, T. A., 3rd, & Botella, C. (2002). Virtual reality in the treatment of spider phobia: a controlled study. *Behav Res Ther*, 40(9), 983-993.
- Ghasemi, A., & Zahediasl, S. (2012). Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. *International journal of endocrinology and metabolism*, 10(2), 486-489.
- 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).

- Hasler, B. S., Spanlang, B., & Slater, M. (2017). Virtual race transformation reverses racial in-group bias. *PLOS ONE*, 12(4), e0174965.
- Hollman, J., Brey, R., Robb, R., Bang, T., & Kaufman, K. (2006). Spatiotemporal gait deviations in a virtual reality environment. *Gait Posture*, 23(4), 441-444.
- Hollman, J., McDade, E., & Petersen, R. (2011). Normative spatiotemporal gait parameters in older adults. *Gait Posture*, 34(1), 111-118.
- Imaizumi, S., Asai, T., Kanayama, N., Kawamura, M., & Koyama, S. (2014). *Agency over a phantom limb and electromyographic activity on the stump depend on visuomotor synchrony: A case study* (Vol. 8).
- Janin, M. (2009). *Sensibilité et motricité podales : leur influence sur le contrôle des activités posturo-cinétiques de sujets sains et pathologiques*.
- Kilteni, K., Bergstrom, I., & Slater, M. (2013a). Drumming in immersive virtual reality: the body shapes the way we play. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 19(4), 597-605.
- Kilteni, K., Bergstrom, I., & Slater, M. (2013b). *Drumming in Immersive Virtual Reality: The Body Shapes the Way We Play* (Vol. 19).
- Kilteni, K., Groten, R., & Slater, M. (2012). The Sense of Embodiment in Virtual Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21(4), 373-387.
- Kilteni, K., Normand, J.-M., Sanchez-Vives, M. V., & Slater, M. (2012). Extending Body Space in Immersive Virtual Reality: A Very Long Arm Illusion. *PLOS ONE*, 7(7), e40867.
- Kokkinara, E., Kilteni, K., Blom, K. J., & Slater, M. (2016). First Person Perspective of Seated Participants Over a Walking Virtual Body Leads to Illusory Agency Over the Walking. *Scientific reports*, 6, 28879-28879.
- Kokkinara, E., & Slater, M. (2014). Measuring the effects through time of the influence of visuomotor and visuotactile synchronous stimulation on a virtual body ownership illusion. *Perception*, 43(1), 43-58.
- Kokkinara, E., Slater, M., & Lopez-Moliner, J. (2015). *The Effects of Visuomotor Calibration to the Perceived Space and Body, through Embodiment in Immersive Virtual Reality* (Vol. 13).

- Lott, A., Bisson, E., Lajoie, Y., McComas, J., & Sveistrup, H. (2003). The effect of two types of virtual reality on voluntary center of pressure displacement. *Cyberpsychol Behav*, 6(5), 477-485.
- Luyat, M. (2014). Les apports de la psychologie cognitive et de la neuropsychologie dans la compréhension de l'anorexie mentale. *Journal de Thérapie Comportementale et Cognitive*, 24(3), 114-121.
- Manolova, A. V. (2012, 24 Avril 2012). Chapitre 2 : Description anatomique du mouvement.
- Marcoux, S. (2015). *Contrôle haptique d'un tapis roulant orthopédique* (École de technologie supérieure).
- McComas, J., & Sveistrup, H. (2002). Virtual Reality Applications for Prevention, Disability Awareness, and Physical Therapy Rehabilitation in Neurology: Our Recent Work. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 26(2), 55-61.
- Merians, A. S., Tunik, E., & Adamovich, S. V. (2009). Virtual reality to maximize function for hand and arm rehabilitation: exploration of neural mechanisms. *Stud Health Technol Inform*, 145, 109-125.
- Mirelman, A., Maidan, I., Herman, T., Deutsch, J. E., Giladi, N., & Hausdorff, J. M. (2011). Virtual reality for gait training: can it induce motor learning to enhance complex walking and reduce fall risk in patients with Parkinson's disease? *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 66(2), 234-240.
- Neill, G. (2018). The most common yoga injuries and how you can avoid them. part III: hips. Repéré
- Normand, J. M., Giannopoulos, E., Spanlang, B., & Slater, M. (2011). Multisensory stimulation can induce an illusion of larger belly size in immersive virtual reality. *PLOS ONE*, 6(1), e16128.
- Pan, X., & Hamilton, A. F. d. C. (2018). Why and how to use virtual reality to study human social interaction: The challenges of exploring a new research landscape. *British Journal of Psychology*, 109(3), 395-417.
- Pavare, Z., Garuta, I., Ananjeva, T., & Smolovs, A. (2015). *Gait rehabilitation of post-stroke patients by treadmill gait training with visual feedback* (Vol. 42).

- Petkova, V. I., & Ehrsson, H. H. (2008). If I Were You: Perceptual Illusion of Body Swapping. *PLOS ONE*, 3(12), e3832.
- Powell, W. A. (2011). *Virtually walking : Factors influencing walking and perception of walking in treadmill-mediated virtual reality to support rehabilitation* (University of Portsmouth).
- Rose, F. D., Atree, E. A., Brooks, B. M., & Johnson, D. A. (1998). Virtual environments in brain damage rehabilitation: a rationale from basic neuroscience. Dans G. Riva, B. K. Wiederhold & E. Molinari (Éds.), *In Virtual Environments in Clinical Psychology and Neuroscience: Methods and Techniques in Advanced Patient-Therapist Interaction*. Amsterdam: IOS Press.
- Rosenberg, R. S., Baughman, S. L., & Bailenson, J. N. (2013). Virtual Superheroes: Using Superpowers in Virtual Reality to Encourage Prosocial Behavior. *PLOS ONE*, 8(1), e55003.
- Rothbaum, B. O., Hodges, L., Smith, S., Lee, J. H., & Price, L. (2000). A controlled study of virtual reality exposure therapy for the fear of flying. *J Consult Clin Psychol*, 68(6), 1020-1026.
- Saint-Pierre Côté, S. (2017). *Évaluation de l'impact de la modification du retour visuel présenté par un égo-avatar temps réel sur la cinématique de la marche* (École de technologie supérieure).
- Saint-Pierre Côté, S., Charbonneau, P., Aissaoui, R., Nadeau, S., Duclos, C., Mezghani, N., & Labbe, D. (2017). Effect of local modulation of a real-time self-avatar on 3D gait kinematics during natural walking on a treadmill. Dans *2017 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)* (pp. 1-2)
- Samaraweera, G., Guo, R., & Quarles, J. (2013). Latency and avatars in Virtual Environments and the effects on gait for persons with mobility impairments. Dans *2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (pp. 23-30).
- Schultheis, M. T., & Rizzo, A. A. (2001). The application of virtual reality technology in rehabilitation. *Rehabilitation Psychology*, 46.
- Sheik-Nainar, M. A., & Kaber, D. B. (2007). The Utility of a Virtual Reality Locomotion Interface for Studying Gait Behavior. *Human Factors*, 49(4), 696-709.

- Siegel, Z. D., Kelly, J. W., & Cherep, L. A. (2017). Rescaling of perceived space transfers across virtual environments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(10), 1805-1814.
- Slater, M., Perez-Marcos, D., Ehrsson, H. H., & Sanchez-Vives, M. V. (2008). Towards a digital body: the virtual arm illusion. *Front Hum Neurosci*, 2, 6.
- Slater, M., Spanlang, B., Sanchez-Vives, M. V., & Blanke, O. (2010). First person experience of body transfer in virtual reality. *PLOS ONE*, 5(5), e10564.
- Sloot, L. H., van der Krogt, M. M., & Harlaar, J. (2014). Self-paced versus fixed speed treadmill walking. *Gait Posture*, 39(1), 478-484.
- Steinicke, F., & Bruder, G. (2014). *A Self-Experimentation Report about Long-Term Use of Fully-Immersive Technology*.
- Stevens, T., Ruiter, C., van Niel, C., van de Rhee, R., Beek, P., & Savelsbergh, G. (2014). *Measuring Acceleration and Deceleration in Soccer-Specific Movements Using a Local Position Measurement (LPM) System* (Vol. 9).
- Sutherland, D. H., Olshen, R., Cooper, L., & Woo, S. L. (1980). The development of mature gait. *JBJS*, 62(3), 336-353.
- Sveistrup, H. (2004). Motor rehabilitation using virtual reality. *J Neuroeng Rehabil*, 1(1), 10.
- Sveistrup, H. (2004). Motor rehabilitation using virtual reality. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 1(1), 10.
- Taborri, J., Palermo, E., Rossi, S., & Cappa, P. (2016). Gait Partitioning Methods: A Systematic Review. *Sensors (Basel)*, 16(1).
- Tajadura-Jimenez, A., Banakou, D., Bianchi-Berthouze, N., & Slater, M. (2017). Embodiment in a Child-Like Talking Virtual Body Influences Object Size Perception, Self-Identification, and Subsequent Real Speaking. *Sci Rep*, 7(1), 9637.
- van der Krogt, M. M., Sloot, L. H., & Harlaar, J. (2014). Overground versus self-paced treadmill walking in a virtual environment in children with cerebral palsy. *Gait Posture*, 40(4), 587-593.
- Viel, E. (2000). *La marche humaine, la course et le saut: biomécanique, explorations, normes et dysfonctionnements*. Masson.

- Wiederhold, B. K., & Wiederhold, M. D. (2005). The Effect of Presence on Virtual Reality Treatment. Dans *Virtual reality therapy for anxiety disorders: Advances in evaluation and treatment*. (pp. 77-86). Washington, DC, US: American Psychological Association.
- Yang, F., & King, G. A. (2016). Dynamic gait stability of treadmill versus overground walking in young adults. *J Electromyogr Kinesiol*, 31, 81-87.

