

Développement et validation d'un système de simulation de la
proprioception de la marche pour créer un sentiment
d'incarnation en réalité virtuelle

par

Kean KOUAKOUA

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

MONTREAL, LE 6 OCTOBRE 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Kean Kouakoua, 2020



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre 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 génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. Cyril Duclos, Co-directeur
École de réadaptation, faculté de médecine de l'Université de Montréal

M. Carlos Vazquez, Président du Jury
Département génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. Maxime Raison, Examineur Externe
Département de génie mécanique à Polytechnique Montréal

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

LE 28 SEPTEMBRE 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, j'aimerais remercier mes directeurs ainsi que l'ensemble de mon équipe de recherche pour leur patience et leurs conseils avisés. Je tiens aussi à remercier mes proches pour leurs encouragements et leur aide durant toute ma maîtrise.

À l'heure où mon travail participe à diminuer l'importance du geste au profit de la pensée et de l'intention dématérialisées, il me semble essentiel de souligner ces actes de bienveillance à mon égard qui au-delà du virtuel ont constitué ma réalité durant ces trois dernières années.

Développement et validation d'un système de simulation de la proprioception de la marche pour créer un sentiment d'incarnation en réalité virtuelle

Kean KOUAKOUA

RÉSUMÉ

La marche est le principal moyen de locomotion humain, en dehors des moyens de transport ; elle est aussi devenue un facteur important de mesure de l'état de santé et de l'autonomie des individus au quotidien. Cette importance se traduit, dans le milieu de la santé, par l'apparition de constantes de vitesse de marche, d'un nombre de pas journaliers conseillés, mais aussi par l'usage de la marche comme d'un outil de maintien et d'amélioration de la santé. Le domaine de la réadaptation en est un parfait exemple. Par ailleurs, l'engagement, la personnalisation, la modification du comportement l'augmentation du taux de rétention des connaissances ou l'amélioration des apprentissages moteurs sont autant d'éléments qui motivent, dans ce même domaine, l'usage de la réalité virtuelle et du sentiment d'incarnation ; sentiment subjectif « d'être » et de contrôler un avatar qui découle d'une congruence suffisante entre les actes et intentions de l'utilisateur et l'information sensorielle perçue en retour. Ces deux objets possèdent donc un fort potentiel en réadaptation, d'autant plus lorsqu'ils sont utilisés ensemble. Néanmoins, ils se heurtent au problème suivant : une mobilité et un espace réduits constituent des limites pour se déplacer naturellement, pour retranscrire les actions et intentions et finalement pour permettre à l'utilisateur de s'incarner et profiter pleinement des avantages de réalité virtuelle et de la marche. Or, l'usage de patrons de vibrations musculaires permet aujourd'hui de reproduire des afférences sensorielles suscitant la marche sans qu'il n'y ait ni mouvement, ni activité volontaire. L'ensemble de ces éléments justifie donc les objectifs de cette étude : induire l'incarnation et la perception de marche en réalité virtuelle, sans mouvement ni commande volontaire, et mesurer l'impact de la synchronisation et de la complexité des patrons de vibrations utilisés à cet effet.

Pour ce faire, cinq conditions, dont quatre couplées à des patrons de vibration, ont été évaluées à l'aide de tests en choix forcés avec alternative, de questionnaires et de mesures sur le centre de pression. Les résultats de l'analyse des données subjectives ont révélé des effets positifs sur l'incarnation et la perception de marche, indépendamment de la stimulation proprioceptive utilisée, et ce, dans des proportions similaires à celles proposées par la littérature. Les résultats concernant le comportement des oscillations antéropostérieures du centre de pression révèlent des effets distinctifs en fonction du degré de synchronisation et du réalisme des afférences sensorielles constituant chaque stimulation visuoproprioceptive. De plus, la fréquence d'oscillation du centre de pression concorde avec la cadence de marche de l'avatar. On en déduit que plus la synchronisation et le réalisme des stimulations sont importants, plus l'incarnation, la perception de marche et la réponse motrice sont fortes.

Mots-clés: Incarnation, réalité virtuelle, illusion, proprioception, vibration

Proprioceptive stimulation added to a walking self-avatar enhances the perception of walking in static participants

Kean KOUAKOUA

ABSTRACT

Besides vehicles and animals, human locomotion remains the primary mode to navigation through our environment and became a major factor to determine the state of health and human autonomy in daily life. Especially in the field of rehabilitation where factors as the ideal gait speed to navigate through our environment, a recommendation about daily number of steps as well as human locomotion as a tool to maintain and improve health are of importance. Moreover, engagement, personalized modifications, behavior modification, improving rate of retention and motor learning skills are non-negligible arguments in favour of the use of virtual reality and embodiment in the field of rehabilitation. Embodiment refers to the subjective sensations of ownership and control over an avatar based on sensorial congruence between real actions and intentions and the perceived results. Therefore, both locomotion and embodiment have great potentials for rehabilitation, especially when combining them.

Nevertheless, lack of mobility and space are important limitations in terms of natural navigation through any environment (real or virtual), as those can affect movement patterns and intention and can limit the user to establish embodiment hence, depriving the individual of any advantages of virtual reality and locomotion. However, muscle vibration allows us to mimic gait sensorial afferences producing any voluntary muscle commands pre-recorded. All of the above-mentioned aspects justified our objectives : to determine if the addition of lower-limb muscle-vibrations with gait like patterns to a walking visual self-avatar can improve the perception of walking in healthy standing individuals, and to compare the effects of the complexity of the vibration patterns and of their synchronicity on the sense of embodiment and perception of walking. To do this, five conditions included four with gait-like patterns of vibration were assessed. All conditions were evaluated with questionnaires, two alternatives forced choice and the center of pressure. Similar to previous literature results on visuo-tactile stimulations the subjective results showed positive effects of adding proprioceptive stimulation on the embodiment and the walking perception with no significant influence of the vibration pattern. Whereas anteroposterior oscillations of the center of pressure seems to be related to realness of gait-like patterns of vibration and synchronicity between sensorial stimulations. Moreover, the oscillation frequency of the center of pressure corresponds to the avatar's walk pace. We conclude that the more synchronized and realistic the sensorial stimulations are, the stronger the embodiment, walking perception, and the motor response to stimuli will be.

Keywords: Embodiment, virtual reality, illusion, proprioception, vibration

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Cycle de la marche	5
1.1.1 Contrôle de la marche	8
1.1.2 Proprioception	9
1.1.3 Informations visuelles	10
1.1.4 Importance relative des informations sensorielles	11
1.2 Altérations des informations sensorielles proprioceptives et visuelles	11
1.2.1 Contrôle moteur et vibrations tendineuses	12
1.2.2 Illusion proprioceptive et visuelle	15
1.3 Réalité virtuelle	18
1.3.1 Avatar, environnement virtuel et incarnation	19
1.3.1.1 Sentiment d'égo-localisation	19
1.3.1.2 Sentiment d'appropriation	20
1.3.1.3 Sentiment d'intentionnalité	21
1.3.2 Incohérences sensorielles spatiotemporelles et limites en réalité virtuelle	23
1.4 Incarnation et illusions de marche en réalité virtuelle	24
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	33
2.1 Problématique	33
2.2 Objectifs	35
2.3 hypothèses	35
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	37
3.1 Environnement virtuel et égo-avatar	37
3.2 Montage expérimental et matériel	39
3.3 Recrutement	42
3.4 Protocole	42
3.5 Conditions expérimentales	43
3.5.1 Condition de stimulation de référence	44
3.5.2 Condition de stimulations « synchronisée »	45
3.5.3 Condition de stimulations « retardée »	46
3.5.4 Condition de stimulations « déphasée »	47
3.5.5 Condition de stimulations « latéralisée »	48
3.5.6 Patrons de vibration	49
3.6 Choix forcé avec alternatives (2AFC) et questionnaire	51
3.6.1 Déroulement d'un test en 2AFC	51

3.6.2	Combinaisons de conditions pour le 2AFC, pointage et classification	52
3.6.3	Déroulement d'un test avec questionnaire	52
3.6.4	Questionnaire utilisé	53
3.7	Analyse du centre de pression : CdP	55
3.7.1	Analyse de la position du CdP	55
3.7.2	Analyse de l'aire	57
3.7.3	Analyse des fréquences et amplitudes	57
3.8	Méthode d'analyse statistique	58
3.9	Résumé des données analysées	59
CHAPITRE 4 RÉSULTATS		61
4.1	Caractéristiques démographiques	61
4.2	Données subjectives sur la perception de marche et le sentiment d'incarnation	61
4.2.1	Résultats du 2AFC	62
4.2.2	Résultats par combinaison de conditions du 2AFC	63
4.2.3	Résultats des questionnaires	64
4.2.3.1	Impression de marche	64
4.2.3.2	Sentiment d'appropriation	65
4.2.3.3	Sentiment d'intentionnalité	66
4.2.3.4	Sentiment de localisation	67
4.2.4	Résultats du score total d'incarnation	68
4.3	Données sur le centre de pression	69
4.3.1	Déplacements moyens AP et ML sur l'ensemble de la population	69
4.3.2	Aire couverte par le CdP	70
4.3.3	Amplitude d'oscillation du CdP à 0,84 Hz	71
CHAPITRE 5 DISCUSSION		73
5.1	2AFC	74
5.2	Questionnaires	74
5.3	Analyse du CdP	76
5.4	Limites techniques	78
CONCLUSION		79
ANNEXE I COMPLÉMENTS		81
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		83

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Division du cycle de marche 6
Figure 1.2	Évolution angulaire au cours de plusieurs cycles de marche (Hanche, genou, cheville) entre 0 et 100% 7
Figure 1.3	Gauche - Évolution du CdP chez un participant statique en fonction du rythme d'oscillation imposé par un métronome. Droite - Déplacement du CdP selon les axes antéropostérieur et médiolatéral selon deux vitesses de marche sur 10 participants sains comptant 20 essais chacun 8
Figure 1.4	Informations sensorielles nécessaires à la marche normale..... 9
Figure 1.5	Montage expérimental, induction de mouvements de marche par l'application de patrons de vibrations..... 14
Figure 1.6	Infographic : The Rubber-Hand Illusion..... 16
Figure 1.7	Image de gauche : outil de stimulation proprioceptive par vibration. Image de droite : résultats de l'évaluation subjective sur 10 de l'illusion de mouvement avec et sans retour visuel en réalité virtuelle..... 17
Figure 1.8	Modèle comparateur 21
Figure 1.9	Attribution d'un geste de la main retransmis sur un écran avec plusieurs délais temporels au sein de trois populations 22
Figure 1.10	Comparatif de trois méthodes de contrôle des déplacements dans des environnements virtuels : (a) manette, (b) reconnaissance du mouvement des mains avec un leap motion, (c) trois pas sur place 26
Figure 1.11	Session d'entraînement à la marche en réalité virtuelle sur tapis roulant 26
Figure 1.12	Participant immobile en situation de marche en réalité virtuelle à la 1ère et 3e personne..... 28
Figure 1.13	Participant installé dans un simulateur de marche en zone urbaine et résultats partiels des questionnaires avec premier quartile, troisième quartile, médiane et - * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 29

Figure 1.14	Gauche : perception de marche et présence en fonction des retours visuels et vibratoires - Droite : perception de marche et présence en fonction de l'environnement, de la vibration et de l'enregistrement de marche	30
Figure 1.15	Études intégrant la tâche de marche en réalité virtuelle.....	31
Figure 3.1	Avatar et environnement virtuel utilisés pour l'ensemble des expérimentations	38
Figure 3.2	Point de vue à la première personne maintenu par le participant aussi souvent que possible durant l'ensemble des enregistrements de l'expérimentation	39
Figure 3.3	Schéma d'installation du matériel expérimental.....	40
Figure 3.4	Montage expérimental : position du matériel, de l'utilisateur et de son champ visuel.....	41
Figure 3.5	Protocole expérimental global avec ses trois phases d'acquisition	43
Figure 3.6	Schéma de synchronisation entre les afférences sensorielles en condition de référence (REF) donc sans retour proprioceptif.....	44
Figure 3.7	Trajectoire du centre de pression suggérée à l'utilisateur par l'ensemble des stimulations appliquées en condition synchronisée (SYN)	45
Figure 3.8	Schéma de synchronisation entre les afférences sensorielles en condition retardée (RET)	46
Figure 3.9	Schéma de synchronisation entre les afférences sensorielles en condition déphasée (DEP)	47
Figure 3.10	Schéma de synchronisation entre les afférences sensorielles en condition latéralisée (LAT)	48
Figure 3.11	Cycles d'activation des six paires de vibrateurs en fonction des angles articulaires	50
Figure 3.12	Déroulement d'un test en choix forcé avec deux options (« two alternative forced choice », abrégé 2AFC) pour les phases expérimentales I et II	51
Figure 3.13	Déroulement d'un test avec questionnaire en phase III	53

Figure 3.14	Apparence du questionnaire utilisé et pointage associé	54
Figure 3.15	Questions utilisées dans le questionnaire sur l'incarnation et la perception de marche	54
Figure 4.1	Résultats des pointages obtenus en 2AFC pour chaque condition.....	62
Figure 4.2	Répartitions des pointages en fonction des paires des conditions testées	63
Figure 4.3	Scores moyens des conditions pour la question Q9 (résultats identiques à Q0) - Phase III	64
Figure 4.4	Scores moyens des conditions pour les questions Q1 et Q2 - Phase III	65
Figure 4.5	Scores moyens des conditions pour les questions Q3, Q4 et Q5 - Phase III	66
Figure 4.6	Scores moyens des conditions pour les questions Q6, Q7 et Q8 - Phase III	67
Figure 4.7	Scores d'incarnation moyens des conditions - Phase III	68
Figure 4.8	Scores d'incarnation moyens des conditions - Phase III	69
Figure 4.9	Déplacements du centre de pression au cours du temps pour le participant 1 pour la dernière répétition de chaque condition	70
Figure 4.10	Aires moyennes couvertes par le CdP et écart type en fonction des conditions	71
Figure 4.11	Amplitudes moyennes d'oscillation à 0,84 Hz pour chaque condition en AP et ML	72

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AP	Antéropostérieur
CdP	Centre de pression

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

cm^2 centimètre carré

dm^2 Décimètre carré

Hz Hertz

INTRODUCTION

De nos jours, il est d'acception commune que le mouvement est synonyme de santé, d'autonomie voire de performance, et cela dans une mesure au moins aussi forte que la tendance inverse invitant à relier une mobilité amoindrie à une pathologie ou au vieillissement.

La capacité de marche chez l'être humain est particulièrement assujettie à cette dichotomie puisqu'en plus d'être le moyen de déplacement le plus naturel chez l'homme, elle fait office de standard de santé dans nos sociétés. La vitesse de marche, la quantité de pas effectués dans la journée ont pris une place considérable dans notre quotidien et prennent place au même titre que les données physiologiques les plus utilisées en médecine telles que la fréquence cardiaque, la fréquence respiratoire, l'oxymétrie ou encore la tension artérielle. Ces données sont mesurées, analysées et standardisées par nos bracelets, nos montres électroniques, nos téléphones et permettent l'apparition de constantes de santé telles que les fameux 10 000 pas conseillés par jour (Tudor-Locke et al., 2008 ; Tudor-Locke et al., 2011). L'amélioration de la capacité de marche est donc devenue un objectif fréquemment utilisé dans le domaine de la santé, notamment en réadaptation, en réponse au vieillissement ou à certaines pathologies affectant les capacités motrices (Mirelman et al., 2011).

Pour améliorer la marche, des outils usant de la réalité virtuelle ainsi que diverses méthodes jouant sur la représentation visuelle (cibles, altérations, scores, etc.) ont été développés et ont permis d'observer des améliorations au niveau des performances motrices, cognitives, de la capacité de rétention des apprentissages et de l'engagement, qui constituent nos objectifs de fond (Slater et al., 1996 ; Fox et Bailenson, 2009 ; Mirelman et al., 2011). La réalité virtuelle permet d'utiliser conjointement un avatar virtuel comme représentation de soi et un environnement virtuel spécifiques visant tous deux l'ensemble des effets positifs cités grâce au sentiment d'incarnation (SI). Cette technologie repose généralement sur une importante capacité de mouvement de l'utilisateur pour pouvoir se mouvoir et interagir avec l'environnement vir-

tuel, certains gestes se voient alors codifier pour être interprétés par l'ordinateur. L'ordinateur fournit ainsi une interaction cohérente entre l'intention première et le résultat observable en réalité virtuelle mais avec une correspondance parfois très faible avec le geste réel comme le montre l'expérience Lee et al. qui utilise diverses modalités de contrôle dont le « LeapMotion » qui associe une gestuelle de la main, une manette ou de grands mouvements de marche sur place, aux déplacements de l'avatar (Lee, Kim et Kim, 2017). On notera que le sentiment d'incarnation est un sentiment subjectif qui apparaît lorsqu'un fort degré de synchronisation lie les actions réelles d'un individu aux actes de sa représentation virtuelle et lui donne l'impression « d'être » cet avatar qu'on observe généralement en vue à la première personne. La création de ce sentiment repose sur trois illusions complémentaires : l'illusion d'être situé dans l'avatar (sentiment de localisation), percevoir le corps de l'avatar comme une extension du corps réel (sentiment d'appropriation) et l'impression que les actes de l'avatar ainsi que les conséquences qui en découlent nous sont imputables (sentiment d'intentionnalité) (Kilteni, 2012).

Comme expliqué ci-dessus, les techniques actuelles utilisant la réalité virtuelle comme seule source de stimulation reposent sur une mobilité importante de l'individu, or ce n'est pas toujours possible. Cela tend donc à diminuer l'efficacité des techniques de réadaptation qui prennent place en réalité virtuelle, ainsi que la taille de la population qui pourrait en profiter. Des expériences récentes ont démontré l'apport non négligeable des stimulations multisensorielles sur l'incarnation et la perception des mouvements de marche au sein d'environnements virtuels en l'absence de mouvements volontaires (Terziman et al., 2012 ; Leonardis et al., 2012 ; Kitazaki et al., 2019 ; Matsuda, 2020). Malgré l'apport de stimulations tactiles ou proprioceptives couplées à la réalité virtuelle, certaines expériences soulignent une incarnation et une perception de mouvement de marche relativement faibles en raison de la passivité des participants. Cependant, aucune de ces études n'utilise d'afférences proprioceptives évoquant la marche et, en plus de demeurer passif, le participant se trouve le plus souvent en position assise. Ensuite, ces études de référence s'appuient principalement sur l'évaluation subjective et

la réponse physiologique des participants pour mesurer les effets de leurs conditions de stimulations sur l'incarnation et la perception de marche (Leonardis et al., 2014; Kokkinara et al., 2016).

Cette étude visera à évaluer l'impact de différents degrés de réalisme et de synchronisation sur les mécanismes sous-jacents de l'incarnation, notamment le sentiment d'intentionnalité, au travers de l'application de stimulations proprioceptives plus réalistes que de simples stimulations tactiles et de stimulations visuelles à la première personne en réalité virtuelle, pour susciter une incarnation et une perception de marche accrue chez un participant immobile en station debout. Les résultats seront analysés selon l'évaluation subjective des conditions expérimentales ainsi que la réponse biomécanique du centre de pression du participant. Chacune des conditions expérimentales sera comparée aux autres afin de mettre en évidence l'influence des paramètres temporels et du degré de complexité des patrons de vibration. Les illusions proprioceptives de marche plus ou moins concordantes avec le retour visuel seront ainsi comparées selon l'incarnation, la perception de marche et la réponse du centre de pression suscitée chez les participants.

Ce mémoire se décompose en cinq chapitres. Le premier présente la revue de littérature entourant les mécanismes de la marche, de proprioception, les illusions proprioceptives, la réalité virtuelle et l'usage d'illusions complexes dans ce cadre. Le second chapitre traite de la problématique, des objectifs et hypothèses qui découlent de la revue de littérature. Le troisième chapitre présente les outils virtuels et méthodologiques mis en œuvre pour pouvoir tester les hypothèses de recherche et analyser l'incarnation, la perception de marche ainsi que les mouvements du centre de pression, propre à chaque condition expérimentale. Le quatrième chapitre présente les résultats des évaluations subjectives des participants obtenus lors des questionnaires et tests de préférence ainsi que les résultats quantitatifs issus du traitement des données sur le centre de pression. Enfin, le dernier chapitre constitue une discussion portant sur les

résultats obtenus et leur comparaison avec nos études de références ainsi que les limites et recommandations qui découlent de cette expérience.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Cycle de la marche

La marche est un mouvement complexe fortement automatisé chez l'être humain permettant au corps d'évoluer dans les trois directions de l'espace. Ce mouvement de propulsion implique tout le corps et s'appuie sur trois articulations à savoir les hanches, les genoux et les chevilles ainsi que des groupes musculaires environnants.

La marche normale peut être divisée en cycles allant de 0 à 100% contenant trois phases comme l'illustre la figure 1.1 (Willems, Schepens et Detrembleur, 2012). Elle commence généralement au moment de l'impact du talon au sol aussi appelé « Heel Strike » et finit à l'impact de ce même talon au sol. Elle est aussi ponctuée par le décollement des orteils ou « Toe off » à 65 % (Willems, Schepens et Detrembleur, 2012) :

Phase d'appui simple (sur un pied tandis que l'autre jambe est en l'air) : 35% du cycle de marche.

Phase d'appui double (sur deux pieds) : 15% chaque durant le cycle de marche (se produit deux fois).

Phase d'oscillation (balancement d'une jambe vers l'avant tandis que l'autre est en phase d'appui) : 35% du cycle de marche.

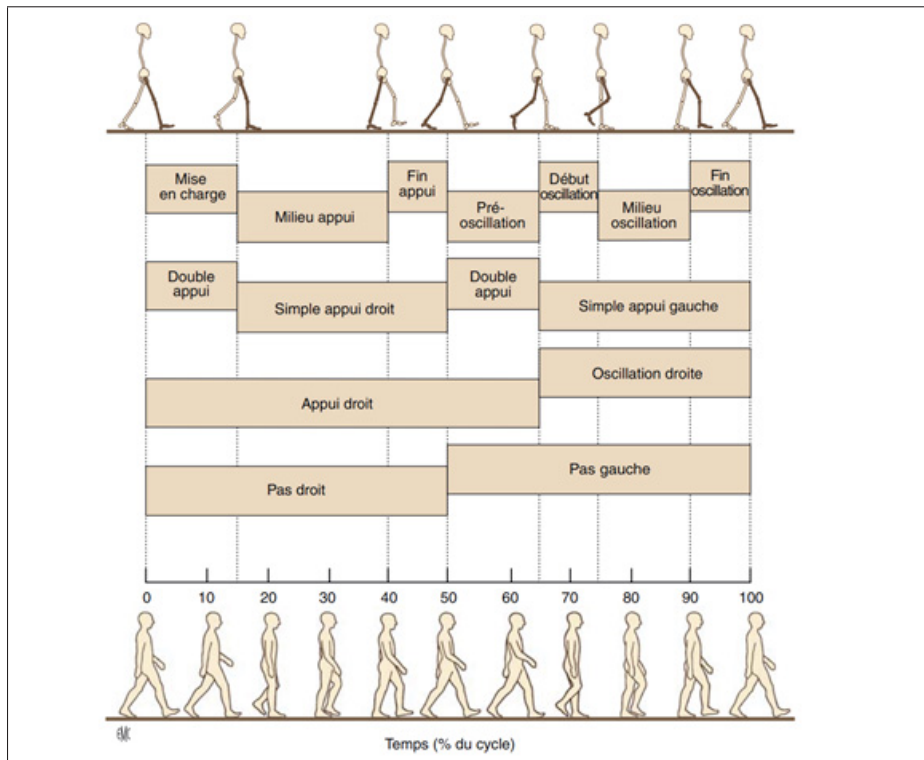


Figure 1.1 Division du cycle de marche
Tirée de Willems et al. (2012)

Il existe plusieurs paramètres spatiotemporels pour caractériser la marche d'un individu tels que la longueur des pas, les angles articulaires ou encore la durée de chaque phase d'appui. Les angles articulaires des hanches, des genoux et des chevilles lors de la marche normale constituent des paramètres d'intérêt. Chaque articulation possède son propre patron angulaire en flexion/extension, ce patron est répété très fidèlement à chaque cycle de marche chez un individu comme le montre la figure 2 (Willems, Schepens et Detrembleur, 2012). Du point de vue sagittal, chaque extremum peut être simplifié comme la transition de l'élongation d'un groupe musculaire fléchisseur vers l'élongation d'un groupe musculaire extenseur ou inversement. Ces élongations induisent des influx nerveux en direction de la moelle épinière appelée afférences qui participent à la proprioception de l'individu.

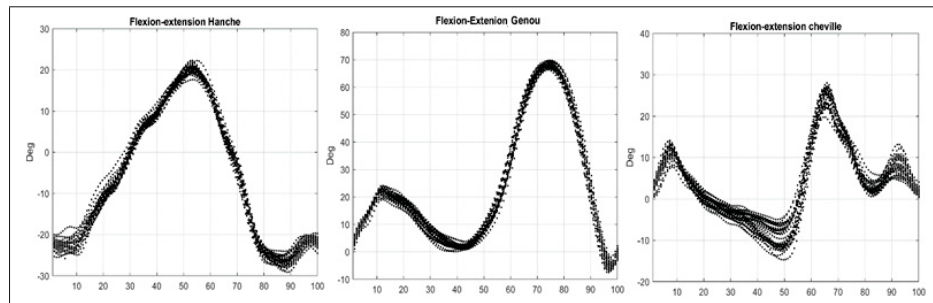


Figure 1.2 Évolution angulaire au cours de plusieurs cycles de marche (Hanche, genou, cheville) entre 0 et 100%

Le paramètre décrivant le nombre de pas réalisés par unité de temps est la cadence de marche d'un individu. Plusieurs études ont mesuré ce paramètre depuis les années 50, plus récemment l'étude de Winter et al. a situé la cadence moyenne d'un individu sain est entre 101 et 120 pas par minute (Winter, 1987).

Le centre de pression (CdP) est une variable physique qui représente le barycentre de toutes les forces exercées au sol par les pieds d'un individu. Dans la mesure où l'individu ne possède que des appuis au sol, ce paramètre est représenté par une position (x,y) dans le plan du sol qui se déplace au cours du temps (Schumann et al., 1995). Du point de vue physiologique, le CdP représente donc la résultante de l'ensemble des forces appliquées par l'individu au sein de la zone délimitée par ses appuis pour maintenir un équilibre dynamique en adéquation avec l'activité en cours. La marche est une activité requérant un équilibre dynamique et l'analyse du CdP d'un individu permet de mieux appréhender les stratégies de réponses mises en œuvre lors de la marche, notamment lorsqu'elle est couplée à une tâche, une stimulation ou encore aux conséquences d'une pathologie (Jian et al., 1993 ; Hesse et al., 1997 ; Santos, Kanekar et Aruin, 2010 ; Chiu, Wu et Chang, 2013). Comme le montre la figure 3, le CdP peut être étudié aussi bien pour analyser des oscillations liées à une posture statique que lors de la marche. Il peut être présenté en analysant ce qui passe sous les deux pieds à la fois au cours du temps, ce qui peut donner lieu à un signal oscillant sur un axe (image de gauche) ou sous chaque pied en superposant les cycles de marche, ce qui s'apparente plus à de l'étude de trajectoire (Schumann et al., 1995 ; Pataky et al., 2014).

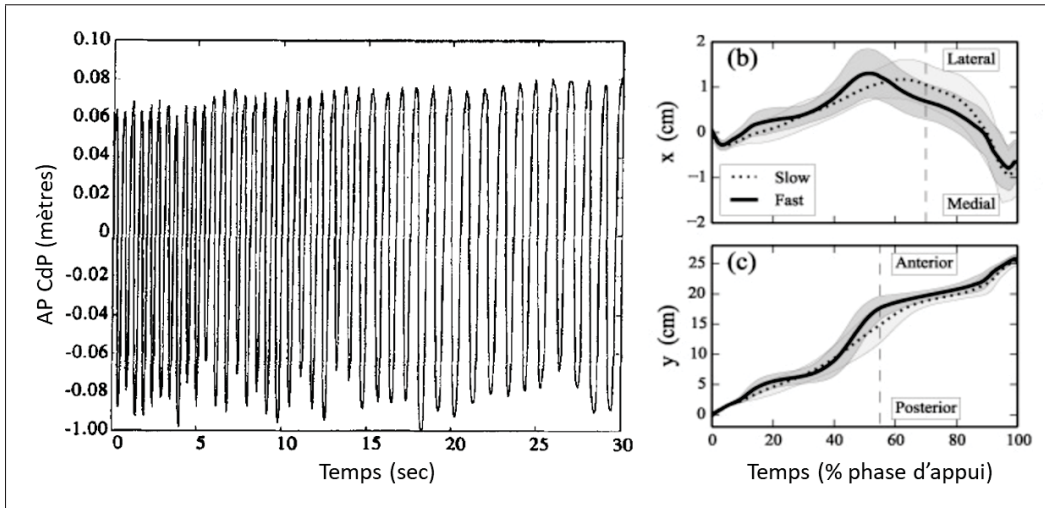


Figure 1.3 Gauche - Évolution du CdP chez un participant statique en fonction du rythme d'oscillation imposé par un métronome. Droite - Déplacement du CdP selon les axes antéropostérieur et médiolatéral selon deux vitesses de marche sur 10 participants sains comptant 20 essais chacun
Tirée de Pataky et al. (2014)

Dans le cas d'une représentation du CdP comme celle de Shumann, l'étude du CdP peut s'apparenter à la notion de cadence de marche par l'intermédiaire de sa fréquence d'oscillation.

1.1.1 Contrôle de la marche

Le maintien de l'équilibre dynamique, et plus spécifiquement le contrôle de la marche, reposent sur l'intégration de plusieurs types d'afférences sensorielles ainsi que les efférences motrices qui en découlent, voir la figure 1.4. Parmi ces afférences, on trouve les informations cutanées de la plante des pieds et des tissus cutanés environnant les articulations, les informations vestibulaires provenant de l'oreille interne, les informations visuelles et toutes les informations proprioceptives provenant des muscles et des articulations (Janin, 2009). Les informations visuelles et proprioceptives sont fréquemment utilisées comme sources de perturbation ou de stimulation lors de tâches en lien avec la marche, comme le démontrent plusieurs études présentées ultérieurement.

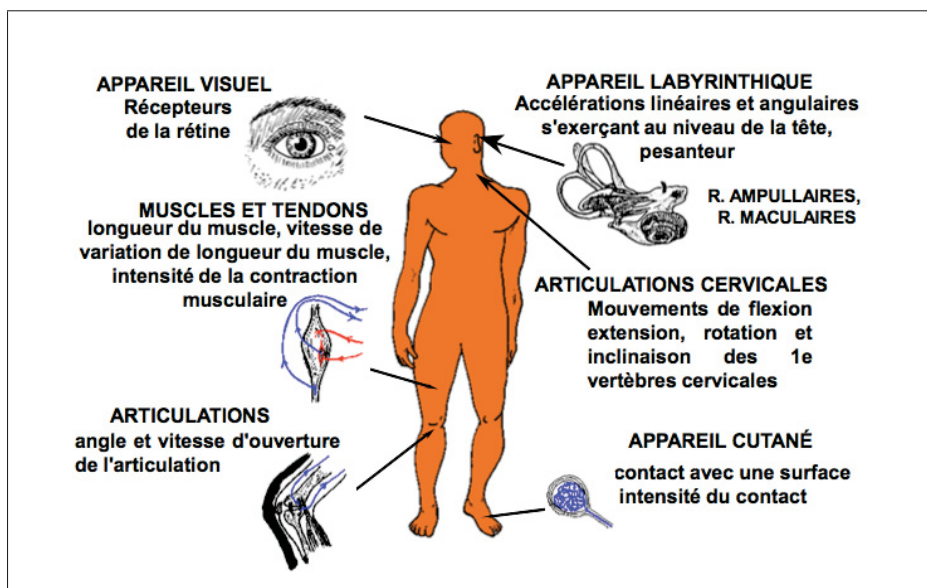


Figure 1.4 Informations sensorielles nécessaires à la marche normale
Tirée de Janin (2009)

1.1.2 Proprioception

La sensibilité proprioceptive de l'être humain est une source primordiale d'information sensorielle qui informe l'individu sur la position relative de chaque segment du corps à tout instant qu'il soit visible ou non et quel que soit le mouvement. Par extension, ce sens est essentiel au maintien de l'équilibre dynamique propre à la marche, les phases qui la composent et toutes les variations qui s'y rattachent (initiation, arrêt, virage, accélération, etc.).

La proprioception repose principalement sur trois récepteurs (Janin, 2009) :

- **les appareils tendineux de Golgi (ATG)** : situés à la jonction entre les tendons et les fibres musculaires, ils informent le système nerveux sur la force contractile appliquée par le muscle ;
- **les fuseaux neuromusculaires (FNM)** : situés au niveau des fibres musculaires, ils informent le système nerveux sur l'élongation des fibres musculaires et la vitesse d'élongation ;

- **les mécanorécepteurs articulaires** : situé dans l'articulation, ils informent le système nerveux sur les angles articulaires, l'accélération et la pression intra-articulaire. De plus, les récepteurs des quatre premières vertèbres cervicales vont jouer un rôle essentiel dans la mobilité conjointe des yeux, de la tête et du cou.

On comprend alors que toute perturbation au niveau de l'information proprioceptive, sa transmission ou son interprétation affecte directement une large variété de tâches dont la marche. Cela explique l'existence de nombreux travaux de recherche en réadaptation notamment avec certaines populations hémiparétiques ou certains amputés ayant des pathologies qui touchent leur capacité proprioceptive (Mullie et Duclos, 2014).

1.1.3 Informations visuelles

Les informations visuelles jouent aussi un rôle majeur dans le contrôle de la marche. On parlera notamment de l'importance du flux optique et comment la manipulation ou l'absence de cette information peut affecter le contrôle de la marche. On peut définir le flux optique comme l'information sensorielle visuelle induite par l'observation du défilement radial de notre environnement au cours de nos déplacements, information qui suscite la sensation et l'appréciation partielle de la vitesse de ce déplacement. Certaines études ont démontré qu'il était possible de modifier la symétrie de la marche, la longueur de pas ou encore la vitesse de déplacement grâce à l'altération du flux optique (Lamontagne et al., 2007 ; Finley, Statton et Bastian, 2014).

Des méthodes de réadaptation telles que la méthode des miroirs s'appuient sur l'importance de l'information visuelle dans la régulation de la marche et se développent grâce à l'utilisation d'environnements virtuels, les études de Lamont et al ou encore Tosi et al en sont de bons exemples (Feasel et al., 2011 ; Lamont, Chin et Kogan, 2011 ; Tosi, Romano et Maravita, 2018). Ces environnements sont propices à la manipulation des informations sensorielles visuelles et proprioceptives, mais aussi permettent d'induire des modifications comportementales comme le démontrent plusieurs études (Botvinick et Cohen, 1998 ; Lamontagne et al., 2007 ; Lamont, Chin et Kogan, 2011 ; Leonardis et al., 2014).

1.1.4 Importance relative des informations sensorielles

Comme nous venons de le voir, plusieurs informations sensorielles participent au contrôle de la marche, mais celles-ci n'ont pas toute la même valeur lors de la phase d'intégration de multiples afférences sensorielles. Certaines sont privilégiées, ce qui nous amène à parler de pondération sensorielle.

Le phénomène de pondération sensorielle peut être défini comme la capacité du système nerveux à attribuer un poids aux différentes informations sensorielles qui lui sont acheminées en fonction de leur degré de fiabilité vis-à-vis de la tâche à accomplir. L'étude de Mullie et Duclos est un exemple de perturbations durant la marche qui affecte la pondération sensorielle des individus en fonction de la tâche à accomplir, de la fiabilité des informations disponibles et de l'état initial des pondérations sensorielles. Dans ce cas de figure, soit les pondérations entre les informations proprioceptives et visuelles évoluent en faveur du visuel lorsque les informations sont suffisamment fiables et permettent de réduire l'impact des perturbations proprioceptives, soit il n'y a pas de changement important de comportement chez les participants dont la pathologie semble avoir altéré l'intégration des informations proprioceptives (Mullie et Duclos, 2014).

1.2 Altérations des informations sensorielles proprioceptives et visuelles

Lorsqu'il s'agit du contrôle de la marche, les informations visuelles et proprioceptives jouent un rôle non négligeable. Plusieurs domaines, dont celui de la réadaptation, fournissent de nombreux exemples d'altérations possibles affectant la marche ainsi que d'autres tâches motrices. C'est pourquoi certaines méthodes de recherches visent à influencer les informations sensorielles visuelles et proprioceptives pour modifier positivement le comportement moteur lors d'une tâche ou d'exercices. Par exemple, l'étude de Goodwin et al en 1972 utilisait des vibrations au niveau du coude des participants pour influencer la perception de la position de l'avant-bras, en altérant les informations sensorielles proprioceptives venant du segment il était possible de donner l'illusion d'une position autre (Goodwin, 1972). Il est donc essentiel d'illustrer

les méthodes qui durant notre étude vont permettre de modifier ces retours sensoriels et créer ce que nous appellerons une illusion visuoproprioceptive de mouvement de marche (Leonardis et al., 2014).

1.2.1 Contrôle moteur et vibrations tendineuses

L'une des méthodes pour altérer la proprioception d'un individu est l'utilisation de vibrations. Il existe plusieurs études qui traitent de l'influence des stimulus vibratoires sur les récepteurs proprioceptifs. Parmi les études pertinentes, nous retrouvons celle de Goodwin et al. en 1972 qui met en avant le fait qu'une vibration à 100 Hz sur les tendons du biceps brachial va permettre de créer une illusion proprioceptive de mouvement du bras (Goodwin, 1972). Dans cette étude, on notera que c'est l'absence de retour visuel sur le bras instrumenté et l'utilisation du second bras « libre » qui permettent de créer et mesurer l'influence de l'illusion de mouvement dans le plan articulaire. Par la suite, d'autres études ont mis en avant l'importance d'une fréquence vibratoire dont la zone d'efficacité est située entre 70 et 80 Hz (Naito et al., 1999).

Les vibrations tendineuses provoquent une perception de mouvement qui implique une réponse des muscles antagonistes cohérente avec la direction du tendon visé. Il est aussi possible de créer une illusion plus complexe résultant de la vibration de plusieurs tendons ou groupes musculaires à la fois comme Calvin-Figuière et al. l'ont démontré en combinant les muscles fléchisseurs et abducteurs du poignet (Calvin-Figuière, Romaiguère et Roll, 2000). De plus, les vibrations peuvent engendrer un « after effect » ou rémanence suite à la vibration qui tend à faire perdurer la perception de mouvement du membre réel. Cet effet de rémanence possède environ 70% de l'intensité du stimulus précédent (Kito et al., 2006).

On notera que la perception de mouvement induite par des vibrations ne requiert pas de commande volontaire du participant pour fonctionner et va permettre de créer des illusions proprioceptives de mouvement sommaires, cependant certaines études telles que celles de Roll et al. ou Duclos et al. vont plus loin. Ces études ont validé un modèle proprioceptif capable de reproduire et induire à l'aide de vibrations n'importe quel mouvement 2D en se basant sur des données préalablement acquises. Les fibres Ia constituent une portion des fuseaux neuromusculaires permettant l'afférence sensorielle proprioceptive qui va être activée lors de vibrations du muscle, or cette activation se produit normalement lors de l'élongation du muscle. De fait, si l'activité sensorielle induite par vibration s'approche de celle associée à la cinématique d'une tâche précise alors on peut percevoir un mouvement ressemblant à cette tâche.

Dans le cas de l'étude de Roll et al, des perceptions de mouvements d'écriture de chiffres et de lettres ont été induites par vibration 2D. Les participants complètement immobiles et avec les yeux fermés ont pu reconnaître près de 75% des patrons proposés, il s'agit donc d'une « illusion proprioceptive de mouvements complexes » (Roll et al., 2009).

Dans l'étude de Duclos et al., deux participants, dont un sain et un avec une lésion de la moelle épinière, ont été exposés à des patrons de vibration au niveau des membres inférieurs via 12 vibreurs. Les vibrations reproduisaient l'information sensorielle de la marche à une cadence de 60 et 120 pas/minute (voir figure 1.5) et ont permis d'induire chez les deux participants des mouvements réels de marche sur place de faible amplitude (Duclos et al., 2014).

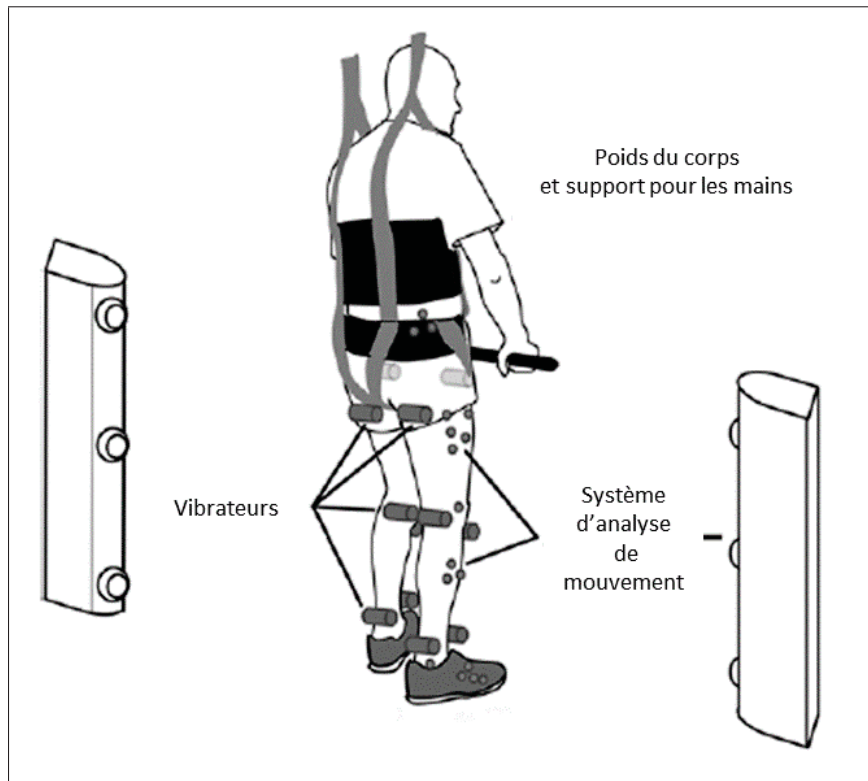


Figure 1.5 Montage expérimental, induction de mouvements de marche par l'application de patrons de vibrations
Tirée de Duclos et al. (2014)

Ces études démontrent que certains patrons de vibration tendineuses permettent d'imiter la cinématique 2D d'un mouvement d'un point de vue proprioceptif et créent l'illusion proprioceptive de mouvement ou encore ils vont permettre d'induire un faible mouvement de marche. On notera que, dans les deux cas, il n'y a pas de mouvement volontaire du participant ni de retour visuel pour pouvoir interpréter l'illusion. D'une moindre façon, l'étude de Sienko et al. complète ce panel de possibles en démontrant que la vibration en tant qu'information tactile peut servir de retour sensoriel complémentaire et ainsi diminuer le déséquilibre médiolatéral durant la marche chez des participants avec des pathologies vestibulaires (Sienko et al., 2013). Un retour visuel normal apparaît alors problématique puisqu'il briserait une illusion proprioceptive seulement basée sur des vibrations. Or le retour visuel est essentiel lors d'une marche dite normale. C'est pourquoi les prochaines études abordées visent à intégrer le retour visuel

de manière à ce que celui-ci permette à l'illusion proprioceptive de subsister voire d'être renforcée comme l'illustre l'expérience de la main en caoutchouc ou « The rubber hand illusion » (Botvinick et Cohen, 1998).

1.2.2 Illusion proprioceptive et visuelle

L'expérience de la main en caoutchouc menée par Botvinick et al. est une étude de référence, elle présente une stimulation visuotactile provoquant une autre forme d'illusion que nous appellerons sentiment d'appropriation ou « sense of ownership » (Kilteni, 2012). Cette stimulation issue d'une illusion visuotactile repose sur le fait qu'un sujet statique est soumis à une stimulation tactile sur sa véritable main qui lui est invisible et une stimulation identique sur une fausse main visible et disposée de sorte qu'elle paraisse liée à son corps, voir figure 1.6. Cette stimulation va progressivement donner l'illusion au participant que la main en caoutchouc lui appartient, donc instinctivement il va retirer sa véritable main lorsque la main en caoutchouc va être menacée (Botvinick et Cohen, 1998). Cette expérience met en avant l'importance et la force d'une illusion intégrant les informations sensorielles de la vue et de la proprioception de façon cohérente. Dans cette situation statique, l'illusion crée une altération du schéma corporel du participant en lui remplaçant un bras par un bras qui n'est pas le sien et influence son comportement en lui donnant l'illusion qu'il pourrait contrôler ce bras lorsqu'il est menacé.

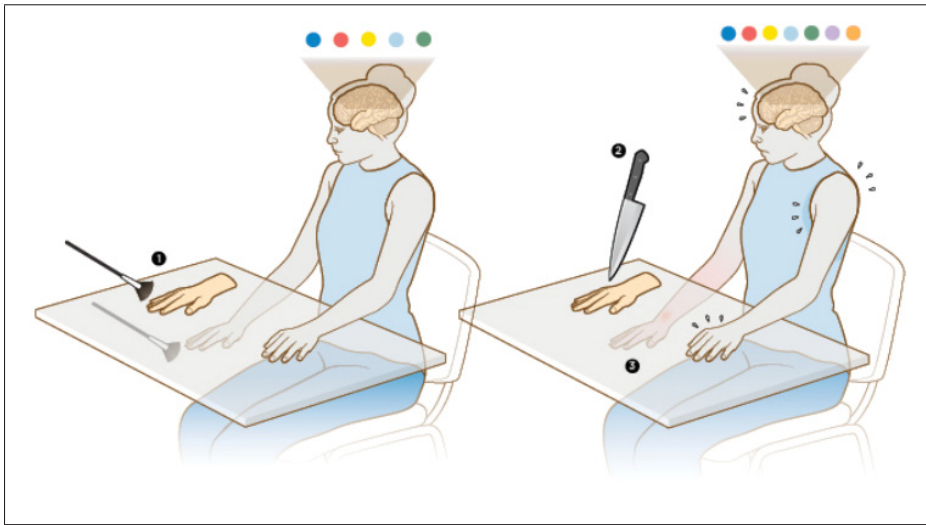


Figure 1.6 Infographic : The Rubber-Hand Illusion
Tirée de Roman Liepelt (2017)

Cette expérience conduit à s'interroger sur le conflit entre l'immobilité requise ou forcée dans certains cas pour pouvoir créer l'illusion de mouvement et comment ce conflit peut être résolu par l'ajout à cette illusion d'un retour visuel cohérent. Comme le laisse entendre l'expérience de la main en caoutchouc, un retour visuel inadéquat ou une incohérence suffisamment importante peut briser immédiatement l'illusion alors qu'au contraire la synchronisation et la cohérence entre les afférences sensorielles favorisent le mécanisme d'appropriation explicité plus loin. Toutefois, il y a au moins deux limitations importantes dans cette expérience qui sont liées à l'usage d'un membre en caoutchouc, l'incapacité technique à reproduire une telle illusion avec l'ensemble du corps et la complexité d'introduire un mouvement réaliste des faux membres, cela sans tenir compte des incohérences sensorielles entre membres réels et fictifs que cela induirait.

La réalité virtuelle est un outil qui offre de nombreux avantages pour réduire les limites de la technique de la main en caoutchouc : elle permet d'aborder la notion d'illusion de façon plus complète en facilitant l'intégration d'afférences sensorielles d'autres types et donc la mise en place d'illusions multisensorielles. Elle permet aussi de représenter l'intégralité du corps et facilite grandement l'introduction de mouvements complexes et réalistes au niveau de la repré-

sensation virtuelle. Par exemple, l'étude menée par Leonardis et al sur l'illusion de mouvement du bras vient parfaitement répondre au problème méthodologique de retour visuel contradictoire avec l'illusion recherchée en utilisant un casque de réalité virtuelle affichant un mouvement du bras de l'utilisateur cohérent avec l'illusion proprioceptive (Leonardis et al., 2012). Les résultats de l'évaluation subjective du mouvement le plus vraisemblable ou réaliste démontrent qu'il n'y a pas de différence significative entre l'illusion proprioceptive seule - à l'image de l'expérience de Goodwin et al. en 1972 - et l'illusion visuoproprioceptive. Ils montrent ainsi que les deux illusions peuvent être cohérentes dans le cas de l'usage de la réalité virtuelle au lieu de s'annuler mutuellement, voir figure 1.7.

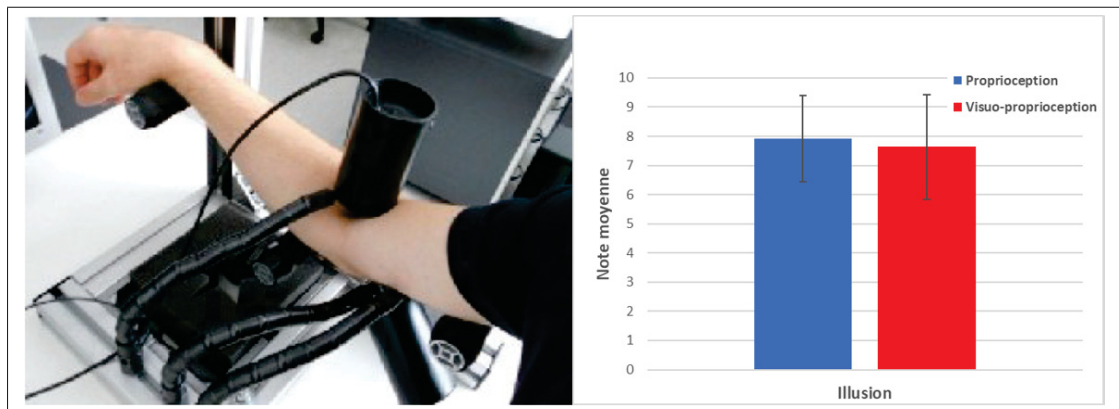


Figure 1.7 Image de gauche : outil de stimulation proprioceptive par vibration.

Image de droite : résultats de l'évaluation subjective sur 10 de l'illusion de mouvement avec et sans retour visuel en réalité virtuelle

Tirée de Léonardis et al. (2012)

1.3 Réalité virtuelle

La réalité virtuelle vise à immerger l'individu, par des moyens technologiques, dans un espace numérique conçu par ordinateur communément appelé environnement virtuel (EV), offrant la possibilité d'interagir et dans lequel le ou les utilisateurs consentent à se « prendre au jeu » (Bouvier, 2009). Elle ne doit pas être confondue avec la réalité augmentée qui vient projeter des objets intangibles conçus par ordinateur sur notre réalité par l'entremise d'informations sensorielles visuelles.

De l'expérience de la réalité virtuelle découlent deux concepts fondamentaux et inter-reliés qui sont l'immersion et la présence. L'immersion représente la capacité d'un média technologique à retranscrire fidèlement des informations sensorielles telles que nous les percevons, alors que l'illusion de présence en réalité virtuelle, qui découle de l'immersion, peut être définie comme suit : « le sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où notre corps se trouve » (Bouvier, 2009). Cette expérience, comme l'explique Bouvier, repose sur des aspects technologiques, techniques et psychologiques qui tendent à faire de l'expérience de l'immersion et de la présence une expérience subjective. Pour la part psychologique, l'aspect subjectif de l'expérience vécue dans la réalité virtuelle est un élément clé de l'interprétation des performances menées en réalité virtuelle comme tend à le prouver l'expérience de Slater et al avec un jeu d'échecs en 3D (Slater et al., 1996). On notera que dans les conclusions d'une étude précédente de Slater et al. sur l'influence de la marche sur la présence, sont abordées les notions d'avatar virtuel, d'incarnation et de conflit visuoproprioceptif avec la latence ou encore l'immobilité de certains membres qui feront l'objet d'autres paragraphes dans cette revue de la littérature (Slater, Usoh et Steed, 1995).

Un autre exemple de l'influence des trois dimensions sur la présence est l'attention portée aux ombres dans la réalité virtuelle ainsi que l'intégration d'éléments sensoriels répondant aux préférences du participant (Slater, Usoh et Chrysanthou, 1995) et qui correspond à l'évolution vers des systèmes intégrant des stimulations multisensorielles comme nous le verrons par la suite.

1.3.1 Avatar, environnement virtuel et incarnation

Un avatar virtuel ou égo-avatar est la représentation virtuelle d'un individu au sein d'un environnement virtuel et au travers duquel l'utilisateur va pouvoir interagir avec cet environnement. L'utilisation d'un avatar et l'apparence qu'il revêt peuvent engendrer des modifications comportementales comme le démontrent plusieurs études (Slater, Usoh et Steed, 1995 ; Fox et Bailenson, 2009 ; Peck et al., 2013 ; Seinfeld et al., 2018). De plus, la présence d'un avatar permet de voir naître le sentiment d'incarnation ou « embodiment », une forme d'illusion utilisée dans des domaines aussi variés que le divertissement, la psychologie, l'apprentissage moteur ou encore dans le cadre de la réadaptation pour des tâches aussi complexe que la marche (Slater et al., 1996 ; Sveistrup, 2004 ; Fox et Bailenson, 2009 ; Charbonneau et al., 2017). Il est important de souligner que les liens entre le sentiment d'incarnation, l'apparence de l'avatar virtuel, la performance motrice et les modifications comportementales résultant des expériences en réalité virtuelle sont encore mal compris. Toutefois, on notera que les mécanismes permettant la création d'une illusion visuoproprioceptive sont aussi favorables au développement du sentiment d'incarnation. Illusion proprioceptive et sentiment d'incarnation requièrent tous deux un certain degré de cohérence et de synchronisation des afférences sensorielles.

D'après l'étude menée par Kilteni en 2012, on peut voir le sentiment d'incarnation comme la combinaison des trois éléments interreliés et complémentaires : le sentiment d'égo-localisation (« sense of self-location »), le sentiment d'appropriation (« sense of body-ownership ») et le sentiment d'intentionnalité (« sense of agency »)..

1.3.1.1 Sentiment d'égo-localisation

À la différence de la présence qui se réfère à la sensation d'être situé dans un environnement, le sentiment d'égo-localisation défini par Kilteni désigne la sensation d'occuper un volume de l'espace situé en dehors de son corps réel, souvent ce volume sera celui du corps d'un avatar virtuel. Ce sentiment peut être affecté par des informations tactiles altérant la perception du volume de l'espace occupé par le corps (Normand et al., 2011) et par des informations

vestibulaires (Lopez, Halje et Blanke, 2008). Ces deux informations sensorielles jouent un rôle important dans la marche (Janin, 2009) et, dans le cas des informations vestibulaires, elles peuvent être la cause d'un phénomène de nausée en réalité virtuelle appelé « cybermalaise ». De plus, les points de vue égocentriques (1^{re} personne : 1PP) et exocentriques (généralement appelé 3^e personne : 3PP) peuvent affecter le sentiment d'égo-localisation. Comme le démontre l'étude de Kokkinara et al., le sentiment d'égo-localisation tend à s'améliorer avec une vue à la première personne et favorise ainsi la création d'un sentiment d'incarnation plus fort (Slater et al., 2010 ; Petkova, Khoshnevis et Ehrsson, 2011 ; Kokkinara et al., 2016). Enfin, sans pour autant nuire à l'illusion, il n'est pas rare qu'il se produise une dérive proprioceptive ou « drift » qui résulte de l'intégration de deux afférences sensorielles conflictuelles, menant à la mise en place d'un compromis cognitif où la position perçue (proprioception) du véritable corps dérive progressivement vers la position virtuelle du corps (vision) et inversement sans pour autant qu'il y ait de mouvement réel (Asai, 2015 ; Tajima et al., 2015 ; Fuchs et al., 2016).

1.3.1.2 Sentiment d'appropriation

Kilteni définit le sentiment d'appropriation comme la capacité d'un individu à s'attribuer un objet comme partie intégrante de son corps réel et en faire une source d'émission d'informations sensorielles (Kilteni, 2012).

L'expérience de la main en caoutchouc est un bon exemple de ce que peut être le sentiment d'appropriation pour un « membre fictif » puisque le participant intègre la main en caoutchouc comme une partie de son propre corps durant une courte période (Botvinick et Cohen, 1998). De nombreuses études ont montré que le sentiment d'appropriation ou « body-ownership » peut toucher une partie comme l'ensemble d'un corps virtuel dépendamment des modalités de l'expérience (Normand et al., 2011 ; Petkova, Khoshnevis et Ehrsson, 2011). Le sentiment d'appropriation peut être affecté positivement par les stimulations visuotactiles et visuoproprioceptives (Dummer et al., 2009 ; Tsakiris, Longo et Haggard, 2010). Enfin, l'effet de l'apparence et de la position dans l'espace de l'avatar sur le sentiment d'appropriation semblent avoir un impact, comme le soulignent plusieurs études référées par Kilteni en 2012. Néanmoins, cer-

taines incohérences telles que le changement de genre ne semblent pas empêcher l'apparition du sentiment d'appropriation (Slater et al., 2010).

1.3.1.3 Sentiment d'intentionnalité

Le sentiment d'intentionnalité ou « agency » peut être considéré comme le sentiment d'être en contrôle de façon consciente ou de pouvoir s'attribuer la responsabilité d'actions et de leurs conséquences (Kilteni, 2012). Ce sentiment serait issu du « comparatif conscient entre les conséquences prévues de l'intention transmise et les conséquences perçues », voir la figure 1.8 (David, Newen et Vogeley, 2008 ; Kilteni, 2012).

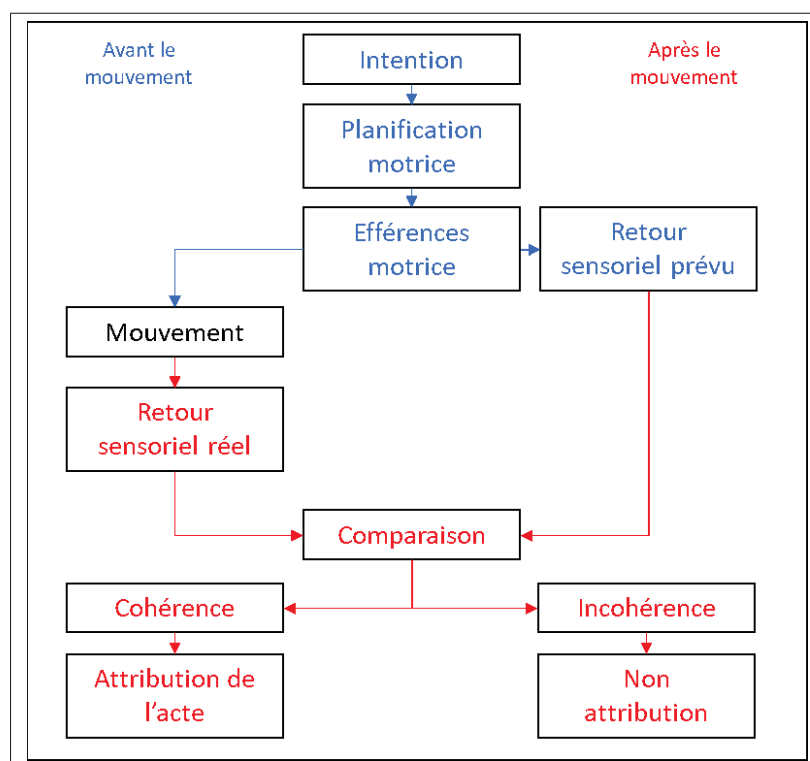


Figure 1.8 Modèle comparateur
Tirée de David et al. (2008)

Une revue de la littérature plus récente présente le sentiment d'intentionnalité comme étant subdivisé en deux niveaux dont la hiérarchie se base sur la complexité des processus cognitifs et le niveau de conscience vis-à-vis du processus mis en œuvre, le ressenti d'intentionnalité (« feeling of agency ») et le jugement d'intentionnalité qui est un processus plus réflexif (Braun et al., 2018 ; Jeunet et al., 2018) .

Par exemple, l'étude de Kokkinara et al. donne l'illusion de contrôle de la marche d'un avatar par l'intermédiaire des mouvements de la tête chez des participants en position assise (Kokkinara et al., 2016). On notera que le sentiment d'intentionnalité est très lié au sentiment d'appropriation et est sensible au niveau de synchronisation visuomoteur : Franck et al. estiment qu'au-delà de 150 ms de latence le sentiment d'intentionnalité diminue, voir figure 1.9.

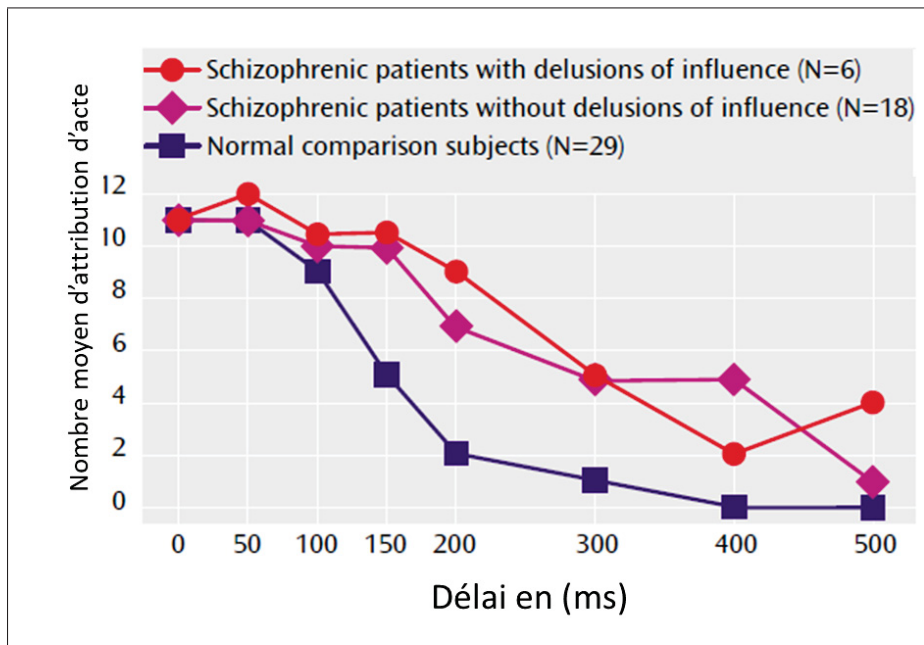


Figure 1.9 Attribution d'un geste de la main retransmis sur un écran avec plusieurs délais temporels au sein de trois populations
Tirée de Franck et al. (2001)

Cela nous amène à présenter les limites connues des illusions que nous souhaitons créer et nous assurer que les diverses afférences sensorielles que nous utilisons ainsi que les incohérences qui peuvent intervenir participent positivement à notre expérience ou tout du moins n'altèrent ni l'incarnation ni l'illusion visuoproprioceptive de façon inappropriée.

1.3.2 Incohérences sensorielles spatiotemporelles et limites en réalité virtuelle

Nous avons parlé de plusieurs illusions qui peuvent facilement être utilisées avec de la réalité virtuelle ou qui la requièrent. La complexité de ces illusions est variable. Celles-ci possèdent de multiples usages dans le divertissement, la recherche ou encore la santé. Il existe des illusions proprioceptives, visuelles, vestibulaires, visuomotrices, visuotactiles, visuoproprioceptives ou encore le sentiment d'incarnation, illusion résultant de la combinaison particulière de plusieurs autres illusions de plus faible niveau. Chacune de ces illusions peut être définie comme une incohérence sensorielle dont les paramètres demeurent interprétables et acceptables par le système nerveux humain. Toutefois, les limites de ces illusions sont parfois très spécifiques, d'où un nombre important d'études portant sur cet aspect. De plus, certaines d'entre elles accentuent le conflit sensoriel perçu comme le sentiment d'appropriation face à une incohérence entre le mouvement attendu et celui observé (Burin et al., 2019).

Le fait de dépasser les limites d'un paramètre créant une illusion en réalité virtuelle peut avoir plusieurs conséquences non exclusives telles qu'une rupture de l'illusion ou la création de cybermalaise ou « simulator sickness ». Dans le contexte militaire, Hettinger et al. ont donné la définition suivante du cybermalaise : « conflit entre les informations visuelles et les informations vestibulaires produisant les mêmes effets que le mal des transports » (Hettinger et al., 1990). Lorsque certaines incohérences ne brisent pas l'illusion, elles peuvent provoquer des mécanismes compensatoires en plus de l'illusion telles que la dérive proprioceptive pour amoindrir le conflit d'information sur la position de segments (Lateiner et Sainburg, 2003 ; Asai, 2015 ; Tajima et al., 2015). De même, on observe une modification de la vitesse de déplacement dans le cas d'altération du flux optique (Lamontagne et al., 2007 ; Finley, Statton et Bastian, 2014).

Les principales sources d'amoindrissement de l'incarnation et autres illusions viennent de décalages spatiaux (ou « offset »), de décalages temporels (signaux asynchrones), de la latence, de la vitesse, de l'accélération et d'autres modifications touchant la sphère spatiotemporelle ou encore de déformations touchant l'égo-avatar. D'un point de vue spatiotemporel, l'étude de Kokkinara et al. a démontré qu'une accélération quatre fois supérieure et un décalage angulaire de 22 degrés sur le bras n'affectent ni le sentiment d'appropriation ni le sentiment d'intentionnalité (Kokkinara, Slater et López-Moliner, 2015).

Concernant la latence, plusieurs aspects entrent en jeu :

- le seuil de détection inconscient de la latence peut atteindre jusqu'à 225 ms durant une tâche de marche en réalité virtuelle (Samaraweera, Perdomo et Quarles, 2015);
- le seuil de détection conscient de la latence serait inférieur à 16 ms (Adelstein, Lee et Ellis, 2003; Ellis et al., 2004);
- le seuil de latence avant que cela ait un impact sur la performance motrice serait de 70 à 80 ms (Lippi et al., 2010);
- le seuil de latence avant d'impacter le sentiment d'intentionnalité est de 150 ms (Franck et al., 2001).

Ces études démontrent l'importance de la latence et du degré de naïveté du participant pour pouvoir créer ou maintenir le sentiment d'intentionnalité et donc le sentiment d'incarnation. La synchronisation temporelle peut aussi impacter l'illusion visuoproprioceptive de marche, ce paramètre peut donc profondément affecter les résultats de l'expérience et son interprétation.

1.4 Incarnation et illusions de marche en réalité virtuelle

Créer l'illusion de la marche, l'utiliser ou encore la modifier dans le contexte de la réalité virtuelle sont des sujets d'études qui tendent à se populariser avec les années grâce à l'évolution technologique, technique et l'amélioration de la compréhension des mécanismes que la marche requiert. Pourquoi s'intéresser à la marche ? La marche est une tâche complexe fortement ancrée dans le comportement humain, elle est naturelle et représente notre principal

mode de déplacement loin devant la course ou la natation en l'absence de tout moyen de transport. De plus, la marche est source d'autonomie et de santé, mais elle devient plus difficile, voire impossible, avec le vieillissement et la maladie. Bien qu'il soit encore complexe de marcher en réalité virtuelle pour des raisons techniques ou environnementales, la réalité virtuelle représente un support favorable au développement et au maintien de cette tâche essentielle et naturelle, d'autant plus qu'il devient possible de simuler la marche. Il s'agira donc ici de mettre en lumière les aspects clés de publications liées à notre problématique de recherche.

Premièrement, l'étude réalisée par Slater et al en 1995 visait à comparer la présence et le cybermalaise suscités par deux méthodes de contrôle d'un avatar virtuel, par pointage ou par utilisation de la position du champ visuel couplé à un algorithme de reconnaissance de l'activité de marche sur place. Durant les deux phases expérimentales, les participants devaient réaliser des tâches impliquant la saisie d'objets par une action manuelle du doigt et se déplacer dans l'environnement virtuel soit par pointage soit en marchant sur place. Bien qu'il n'y ait pas de différence significative entre les modalités de déplacement, les résultats tendent à indiquer une meilleure expérience de navigation avec la méthode de marche sur place et proposent des éléments d'influence qui s'apparentent au sentiment d'appropriation de l'avatar, au sentiment d'intentionnalité ainsi que la latence et la fiabilité du système. D'autre part, l'étude de Lee et al. comparait l'immersion et le cybermalaise en fonction de trois environnements virtuels avec différents niveaux de détails et en fonction du moyen de contrôle pour s'y déplacer, voir figure 1.10 : une manette, la gestuelle des mains reconnue par un Leap motion, trois pas sur place (Lee, Kim et Kim, 2017). L'étude de Lee et al démontre que l'usage de mouvements de marche par rapport aux autres méthodes de contrôle a un meilleur effet sur la présence, l'immersion et le cybermalaise.

L'étude de Mirelman et al. avait pour but de montrer l'apport de l'entraînement à la marche et l'évitement d'obstacles en réalité virtuelle pour des participants ayant la maladie de Parkinson. Cette étude proposait à 20 participants âgés de s'entraîner à la marche en réalité virtuelle sur un tapis roulant avec et sans obstacle durant 18 sessions étalées sur un mois, voir figure 1.11. Les résultats démontrent une amélioration des capacités motrices et cognitives des participants,

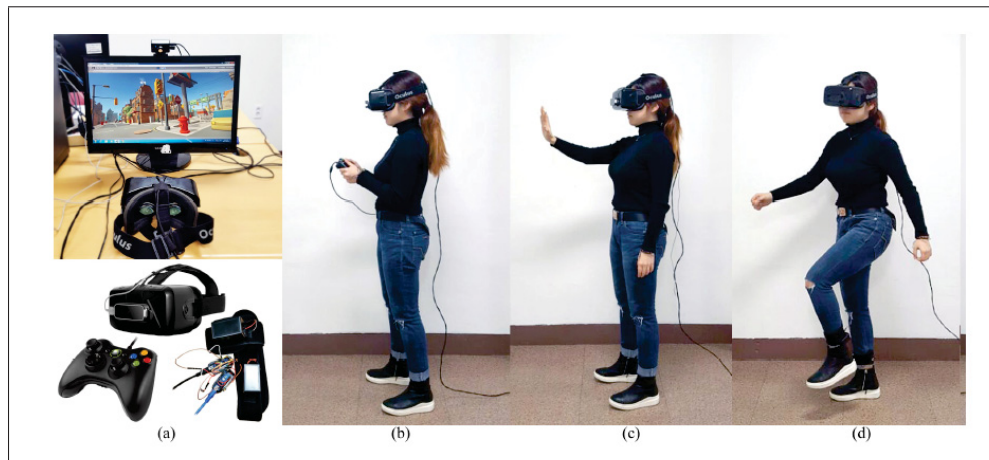


Figure 1.10 Comparatif de trois méthodes de contrôle des déplacements dans des environnements virtuels : (a) manette, (b) reconnaissance du mouvement des mains avec un leap motion, (c) trois pas sur place
Tirée de Lee, Kim et Kim (2017)

confirment des gains à long terme et offrent ainsi une avenue prometteuse pour comprendre et lutter contre cette pathologie ainsi que les effets du vieillissement sur le risque de chute (Mirelman et al., 2011).

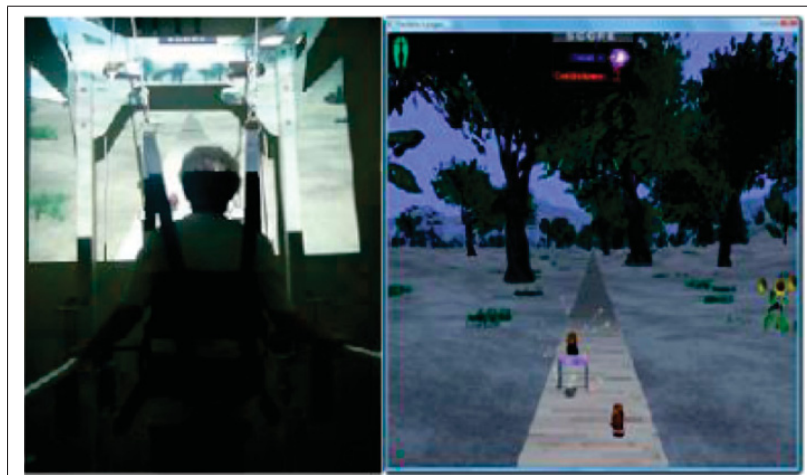


Figure 1.11 Session d'entraînement à la marche en réalité virtuelle sur tapis roulant
Tirée de Mirelmen et al. (2011)

Ces études démontrent l'intérêt du choix de la tâche de marche comme moyen essentiel et bénéfique de déplacement en réalité virtuelle chez l'humain et permettent de cerner certains paramètres favorables à la réalisation de cette tâche en réalité virtuelle : une stimulation multisensorielle, une vue à la première personne, un avatar, un environnement, un système favorisant l'immersion et l'incarnation (appropriation, intentionnalité, localisation) et une méthode de contrôle favorisant l'usage de processus cognitifs similaires à ceux de la tâche retranscrite dans l'environnement virtuel.

Deuxièmement, l'étude réalisée par Kokkinara et al. en 2016 visait à analyser le sentiment d'intentionnalité (et l'incarnation) chez un individu immobile en situation assise dirigeant la marche de son avatar par le regard en fonction de deux paramètres. Le point de vue était en première ou troisième personne et intégrait ou non les mouvements du champs visuel correspondants aux déplacements de la tête lors de la marche de l'avatar. Les participants devaient, en bougeant uniquement la tête, prendre connaissance de leur avatar, parcourir une certaine distance à plat durant 4 minutes à raison d'un cycle de marche toutes les 1,267 secondes avant de gravir une colline pendant 44 secondes, voir figure 1.12. Les données d'incarnation et de perception de marche ainsi que les données physiologiques de fréquence cardiaque, fréquence respiratoire et conductivité de la peau ont été mesurées pour déterminer l'impact des oscillations et du point de vue. Cette étude confirme pour nous l'intérêt du point de vue à la première personne sans oscillation et démontre qu'il est possible de ressentir une forte incarnation (sentiment d'intentionnalité) et une forte perception de marche malgré une mobilité réduite et donc un faible degré de contrôle sur l'avatar. De plus, les valeurs physiologiques de la conductivité de la peau et de la fréquence respiratoires semblent cohérentes avec le niveau d'incarnation et de perception de marche indiqué par les questionnaires (Kokkinara et al., 2016).

D'autre part, Léonardis et al en 2014 visaient à démontrer l'intérêt pour l'incarnation d'une stimulation multisensorielle impliquant les informations visuelles, vestibulaires et proprioceptives par rapport à un retour visuel seul. L'étude consistait à installer le participant dans un simulateur pouvant offrir des stimulations visuelles en réalité virtuelle auxquelles étaient ajoutées ou non des stimulations vestibulaires et proprioceptives (par vibrations à l'arrière des



Figure 1.12 Participant immobile en situation de marche en réalité virtuelle à la 1ère et 3e personne
Tirée de Kokkinara et al. (2016)

genoux) cohérentes avec la marche, dans l'objectif de donner l'illusion au participant de se déplacer en marchant dans un environnement urbain sans avoir à faire le moindre mouvement (voir figure 1.13). Une nouvelle fois des données physiologiques ainsi que des questionnaires portant sur l'incarnation et la perception de marche ont été utilisés. Cette étude démontre l'aspect favorable d'un retour visuoproprioceptif et vestibulaire sur : l'incarnation, la perception de marche, la perception de mouvement ainsi que l'engagement. Elle souligne aussi les limitations d'une absence complète de contrôle de l'utilisateur. On notera une seconde fois le lien entre l'incarnation et les données physiologiques de conductivité de la peau et de fréquence respiratoire (Leonardis et al., 2014).

Troisièmement, une étude de Matsuda et al. présentée durant IEEE VR 2020 a comparé l'impact de diverses afférences tactiles (synchrones avec la marche, asynchrones, randomisées)

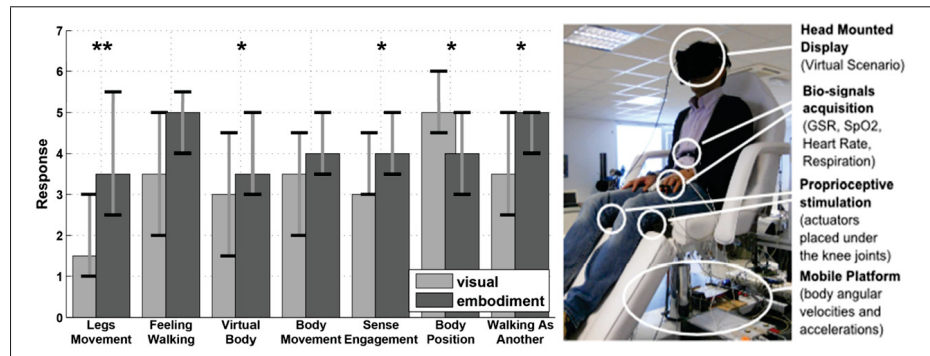


Figure 1.13 Participant installé dans un simulateur de marche en zone urbaine et résultats partiels des questionnaires avec premier quartile, troisième quartile, médiane et - * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$
 Tirée de Leonardis et al. (2014)

transmises par vibrations sous les pieds selon trois conditions visuelles (avatar complet, pied et main seulement, aucun) sur l'incarnation et la perception de mouvements de marche. Les participants étaient en position assise et immergés en réalité virtuelle et pouvaient se voir parcourir un couloir. Des semelles produisaient des vibrations qui pouvaient être en rythme ou non avec la marche de l'avatar et l'apparence de l'avatar était modulée. L'effet de ces deux paramètres a été évalué via quatre questions dont trois portent sur la perception de marche et une sur la présence, voir figure 1.14 à gauche (Matsuda, 2020). Kitazaki et al. ont réalisé une étude très similaire qui s'intéresse à l'apport en réalité virtuelle d'un retour tactile. Ce retour tactile est basé sur l'impact du talon par rapport à une vibration aléatoire ou aucune vibration, et l'impact du niveau de synchronisation entre le visuel et le retour tactile sur : la téléprésence, l'action des jambes perçue, l'impression de marche et l'impression de se déplacer. Ces paramètres sont mesurés à l'aide d'une échelle subjective sur 100 (« VAS Rating »). Ils démontrent ainsi l'effet de l'ajout d'un retour tactile cohérent et l'effet négligeable du délai sur les paramètres précédemment énoncés, voir figure 1.14 à droite (Kitazaki et al., 2019).

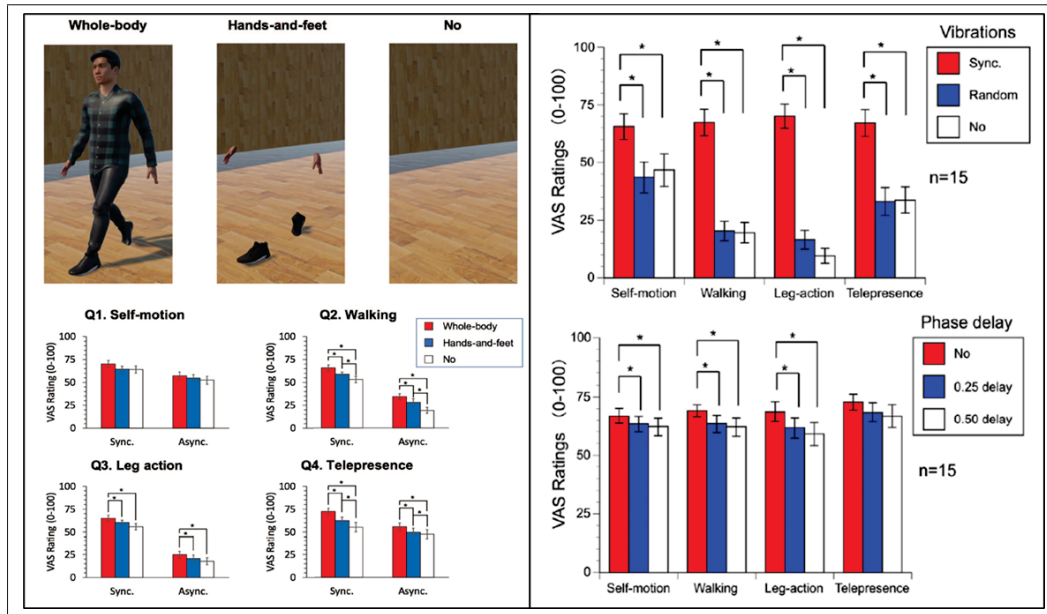


Figure 1.14 Gauche : perception de marche et présence en fonction des retours visuels et vibratoires - Droite : perception de marche et présence en fonction de l'environnement, de la vibration et de l'enregistrement de marche
 Tirées de Mastuda et al. (2020) et de Kitazaki et al. (2019)

Ces deux études soulignent donc l'importance de la synchronisation spatiotemporelle entre plusieurs stimulations et l'impact positif d'une stimulation multisensorielle et synchrone sur la perception de marche en réalité virtuelle. Cela laisse supposer aussi un degré d'influence moindre du retour visuel complet par rapport au retour partiel ou nul de l'avatar sur les perceptions de mouvement de marche et de présence. L'étude tend à démontrer l'importance du rythme des afférences tactiles en présentant des résultats similaires lorsqu'on applique les mêmes vibrations avec différents niveaux de synchronisation (Kitazaki et al., 2019 ; Matsuda, 2020).

Les diverses études présentées dans cette section utilisent des participants debout et mobiles comme Slater, Lee et Mirelman ou assis et immobiles comme Kokkinara, Leonardis, Kitazaki et Matsuda ou encore Terziman présentés dans le tableau 1.15 qui contient la liste des travaux de recherches clés pour cette étude sur la marche en réalité virtuelle. De plus, les vibrations sont soit appliquées comme stimulation tactile aux pieds soit comme stimulation proprioceptive aux

genoux alors que le membre inférieur au complet participe à la locomotion. Ces points feront donc partie de la problématique de recherche présentée à la section suivante.

Auteurs	(Kitazaki <i>et al.</i> , 2019)	(Matsuda, 2020)	(Leonardis <i>et al.</i> , 2014)	(Kokkinara <i>et al.</i> , 2016)	(Terziman <i>et al.</i> , 2012)
Titres	Virtual Walking Sensation by Prerecorded Oscillating Optic Flow and Synchronous Foot Vibration	Perception of Walking Self-Body Avatar Enhances Virtual-Walking Sensation	Multisensory Feedback Can Enhance Embodiment Within an Enriched Virtual Walking Scenario	First Person Perspective of Seated Participants Over a Walking Virtual Body Leads to Illusory Agency Over the Walking	The King-Kong Effects: Improving sensation of walking in VR with visual and tactile vibrations at each step
N =	15,15	20	12	28	12,12,12
Stimulation	Vibrations/ tactiles et VR	Vibrations/ tactiles et VR	Vibrations proprioceptives, VR, vestibulaires	VR : oscillation du champ visuel, 1PP ou 3PP)	Vibration tactile, oscillation du champ visuel, effets sonores
Zones stimulées	Yeux, Pieds	Yeux, Pieds	Yeux, oreilles internes, fléchisseurs genoux	Yeux	Yeux, pieds
Synchronisation par rapport au retour visuel	Aucune stimulation tactile, synchrone à l'impact talon, impact + 0.25s, impact +0.5s, aléatoire	Synchrone à l'impact talon, aléatoire	Aucune stimulation proprioceptive ni vestibulaire ou Synchrone à l'impact talon	Mouvements de tête	Synchrone à l'impact talon
Résultats questionnaires: perception de marche (PM) et incarnation (SI)	PM : importante différence significative avec une sans vibration, faible différence avec ou sans délai de vibration	PM : importante différence entre vibration synchrone et aléatoire	PM : pas de différence significative malgré des valeurs moyennes bien distinctes SI : augmentation avec la stimulation multisensorielle	PM et SI sont meilleurs en 1PP et sans oscillation du champ visuel	PM : meilleure en stimulation multisensorielle avec une vibration décroissante à l'impact talon et sans oscillation du champ visuel
Mesures physiologiques	n/a	n/a	Conductivité de la peau et la fréquence respiratoire semblent liés au SI	Conductivité de la peau, fréquence cardiaque et respiratoire semblent liés au SI	n/a

Figure 1.15 Études intégrant la tâche de marche en réalité virtuelle

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

2.1 Problématique

Les études les plus récentes tendent à créer et comprendre des illusions sensorielles répondant à plusieurs difficultés : le manque d'espace réel pour faire évoluer l'utilisateur dans l'environnement virtuel, des mouvements de marche insuffisants pour être virtualisés et induire la perception multisensorielle des mouvements de marche de l'avatar chez l'utilisateur en réalité virtuelle (visuel et proprioceptif). Par exemple, la réadaptation offre de nombreux cas de pathologies impliquant une incapacité à produire suffisamment de mouvements volontaires pour pouvoir utiliser certaines techniques de réadaptation en réalité virtuelle telle que la méthode des miroirs (Lamont, Chin et Kogan, 2011 ; Tosi, Romano et Maravita, 2018).

D'une part, il existe des illusions proprioceptives complexes capables de créer l'illusion de n'importe quel mouvement 2D préanalysé en le retranscrivant en patron de vibration (Roll et al., 2009). L'utilisation de ces mêmes patrons de vibration a aussi permis d'induire des mouvements de marche sur place de faibles amplitudes sans aucune commande volontaire de l'utilisateur (Duclos et al., 2014). Toutefois, les illusions proprioceptives seules, aussi complexes et vivaces soient-elles, ne permettent pas à l'utilisateur d'avoir un retour visuel sur ses actions sous peine de briser l'illusion. Il est donc intéressant de coupler la réalité virtuelle avec de telles illusions proprioceptives par vibration pour induire la perception de marche sans pour autant se priver des informations sensorielles visuelles (Terziman et al., 2012 ; Leonardis et al., 2014 ; Kitazaki et al., 2019 ; Matsuda, 2020). D'autre part, la réalité virtuelle permet de créer le sentiment d'incarnation qui résulte de l'agencement synchronisé de plusieurs afférences sensorielles suffisamment réalistes ou immersives - tel que décrit par Kilteni - et permet d'influencer le comportement de l'utilisateur comme le démontrent diverses études (Fox et Bailenson, 2009 ; Kilteni, 2012) ainsi que sa perception, ses performances et son engagement (Lippi et al., 2010 ; Charbonneau et al., 2017).

Kokkinara et al. ont démontré qu'il est possible de créer un sentiment d'intentionnalité (et d'incarnation) et la perception de marche chez un utilisateur immobile en situation assise n'exerçant aucune commande volontaire sur ses membres inférieurs (Kokkinara et al., 2016). Ce type d'illusion répond aux limitations d'espace, mais offre uniquement une perception visuelle des mouvements de marche sans mouvement réel de l'utilisateur. L'étude de Léonardis répond partiellement aux trois difficultés énoncées tout en ajoutant des stimulations vestibulaires, mais elle ne permet pas à l'utilisateur d'avoir un ressenti proprioceptif de marche qui intègre le membre inférieur complet dans sa fonction de propulsion (Leonardis et al., 2014). Or, les études de Slater, Lee, Kitazaki et Mastuda rappellent l'apport favorable de la cohérence cognitive, posturale et spatiotemporelle entre les tâches accomplies et les conséquences perçues (sentiment d'intentionnalité), notamment sur la présence, l'incarnation et la perception de marche (Slater, Usoh et Chrysanthou, 1995 ; Lee, Kim et Kim, 2017 ; Kitazaki et al., 2019 ; Matsuda, 2020). De plus, les travaux de Roll, Duclos et Tapin montrent qu'il est possible de produire à l'aide de patrons de vibration des afférences sensorielles suscitant la marche (Roll et al., 2009 ; Duclos et al., 2014 ; Tapin, Duclos et Duclos, 2019).

Il n'existe actuellement aucune étude qui ait combiné une illusion visuoproprioceptive de marche basée sur un retour visuel en réalité virtuelle et un patron de vibrations dans le but d'induire une perception de mouvements de marche qui inclut tout le membre inférieur d'un participant immobile en station debout sans que celui-ci exerce une commande volontaire et en ait mesuré les effets.

2.2 Objectifs

- OS1 : L'objectif principal est de mesurer l'effet de la combinaison d'une stimulation visuelle présentant un avatar en train de marcher avec une stimulation proprioceptive correspondante à l'aide d'un patron de vibrations, sur le sentiment d'incarnation et l'impression de marcher, en l'absence de mouvements volontaires du participant.
- OS2 : L'objectif secondaire est d'observer l'effet de différents niveaux de complexité et de cohérence spatiotemporelle entre les stimulations visuelles et proprioceptives sur l'impression de marche et l'incarnation.

2.3 hypothèses

Hypothèses :

- H1 : En l'absence de commande volontaire de l'utilisateur, l'ajout d'une illusion proprioceptive de marche à partir de vibration permet d'accroître la perception de marche par rapport à une stimulation visuelle seule ;
- H2 : Plus le niveau de cohérence entre les stimulations visuelles et proprioceptives est important et plus la perception de marche sera importante.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Environnement virtuel et égo-avatar

L'environnement virtuel réalisé sous Unity 2017.4.21f1 représente un couloir virtuel inspiré de celui du CRCHUM situé au 7^e étage. Il a été modifié pour atteindre une largeur de 2,35 mètres et d'une longueur initiale de 28 mètres (voir figure 3.1). Le couloir a été répété plusieurs fois pour que l'avatar puisse y marcher 2 minutes et 10 secondes sans en voir l'extrémité, soit l'équivalent en durée de deux conditions expérimentales entrecoupées d'une pause de 10 secondes. Il contient des éléments de couleur facilitant l'appréciation des distances et la vitesse de déplacement (flux optique) tout en évitant d'être une source de distraction. L'environnement virtuel dans Unity permet le contrôle des déplacements de l'avatar, l'activation des vibrateurs et le démarrage de l'acquisition des données des plateformes de forces via un Arduino.

Le site internet MIXAMO a permis d'obtenir l'apparence de l'avatar ainsi que l'animation de respiration en pose statique. L'enregistrement d'une séquence cinématique de marche de 1 minute incluant le corps au complet d'un sujet sain (masculin, 26 ans, 1m80, 75 kg) s'est fait à l'aide d'un système VICON muni de 12 caméras à 200 Hz et du logiciel Tracker 3.6. La séquence de marche enregistrée a été traitée dans Nexus 2.0 afin de corriger les erreurs de position des marqueurs puis elle a été transformée en animation pour être appliquée sur l'avatar provenant de MIXAMO. Le logiciel Motionbuilder 2019 a aussi permis de diminuer l'écart de base des jambes de l'avatar, diminuer la hauteur des épaules, réduire l'ouverture des mains et fluidifier les transitions entre les animations des poses statiques et phases de marche (voir figure 3.1). Ce même enregistrement a permis la création de patrons de vibrations proprioceptifs de marche, voire la section sur les conditions expérimentales.

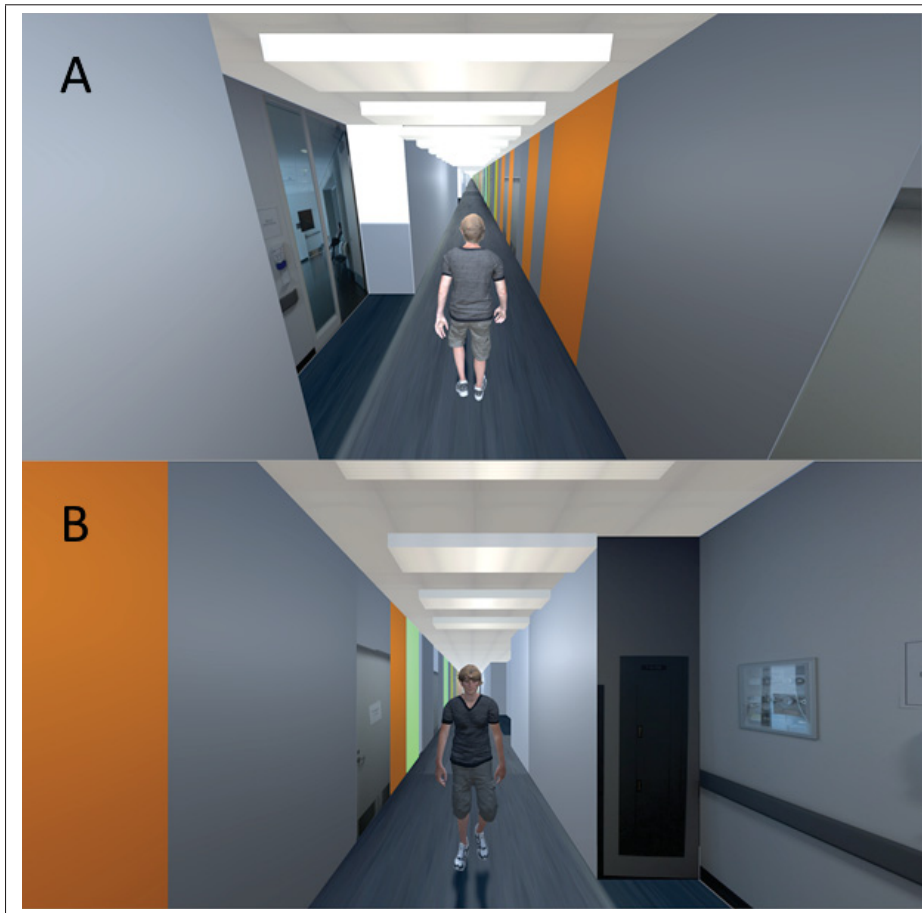


Figure 3.1 Avatar et environnement virtuel utilisés pour l'ensemble des expérimentations

L'avatar utilisé pour l'ensemble de l'expérience est de genre masculin et mesure 1,70 mètre. Il se déplace à 1 m/s avec une cadence de 100,8 pas/min, soit un cycle de marche de 0.84Hz, en dehors des phases d'accélération et de décélération situées dans les 5 premières et 5 dernières secondes de chaque phase de marche. Chaque phase de marche démarre avec le pied droit, quelle que soit la jambe dominante de l'utilisateur. L'utilisateur contrôle la position de la tête tandis que le reste de l'animation de l'avatar se base sur l'enregistrement cinématique de marche pris à l'aide du système VICON retouché avec Motionbuilder. Le lancement des séquences de marche est contrôlé par l'expérimentateur depuis Unity.

Le retour visuel est identique, quel que soit la condition ou le participant. Le point de vue est à la première personne et n'intègre pas les oscillations naturellement induites par la marche au niveau du champ visuel (Kokkinara et al., 2016). De plus, le champ visuel du participant intègre un décalage de 20 degrés vers le bas et le participant a pour consigne de regarder ses jambes le plus souvent possible. Cet ajustement a pour but de limiter l'inconfort, la prise de posture peu naturelle et la consigne doit permettre au participant d'avoir un retour visuel direct sur les mouvements de son avatar afin qu'il puisse prendre en compte les diverses combinaisons de retours proprioceptifs et visuels qui lui sont présentées (voir figure 3.2).

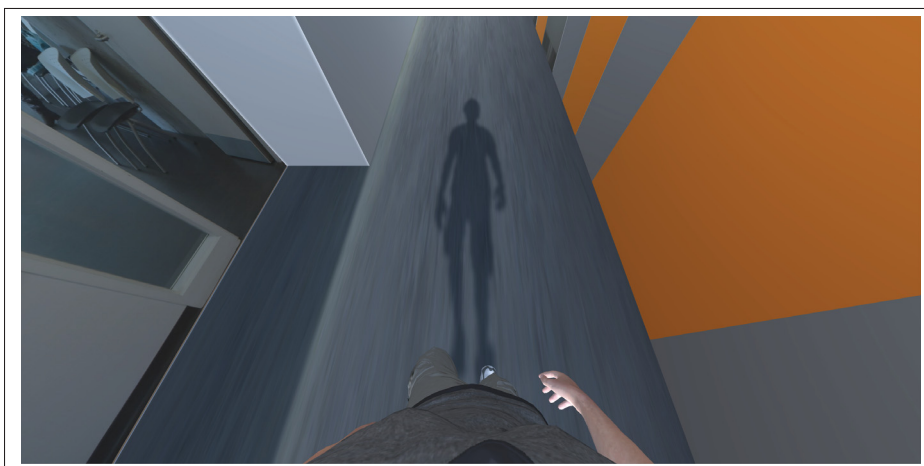


Figure 3.2 Point de vue à la première personne maintenu par le participant aussi souvent que possible durant l'ensemble des enregistrements de l'expérimentation

3.2 Montage expérimental et matériel

Nous avons utilisé un ordinateur portable Asus ROG muni d'un processeur i7-7700HQ, de 16 GB DDR4 et d'une carte graphique Nvidia GTX1070 afin de pouvoir utiliser l'environnement virtuel créé. La visualisation de l'environnement virtuel se fait par l'intermédiaire d'un casque de réalité virtuelle Oculus Rift CV1. Un second ordinateur permet le contrôle des stimulations proprioceptives par vibration qui sont issues de six modules de contrôle reliés à 12 vibreurs (VB 115, Technoconcept) et l'acquisition des données de forces et de moments sous les pieds

du participant à une fréquence de 1000 Hz par l'intermédiaire d'un tapis roulant muni de plateformes de forces (Bertec, fully instrumented treadmill).

Un Arduino Nano (Processeur : ATmega328P (Old Bootloader), programmeur : AVRISP mkII) fait le lien par signaux TTL entre les deux ordinateurs et assure le déclenchement simultané des stimulations et des acquisitions de données. Un signal « GO » codé en C-sharp était envoyé depuis l'ordinateur portable ASUS contenant Unity vers le Arduino qui convertit ce message en signal TTL sous forme d'un front montant de 5 Volts. Le front montant déclenchait alors la lecture de la partition de vibration sélectionnée dans l'interface Labview contrôlant les vibreurs et l'enregistrement de signaux provenant des plateformes de force.

Les questionnaires et réponses ont été étaient recueillis à l'aide d'une tablette via les outils de Google Forms et Excel. La figure 3.3 explicite la structure et les connexions du montage expérimental.

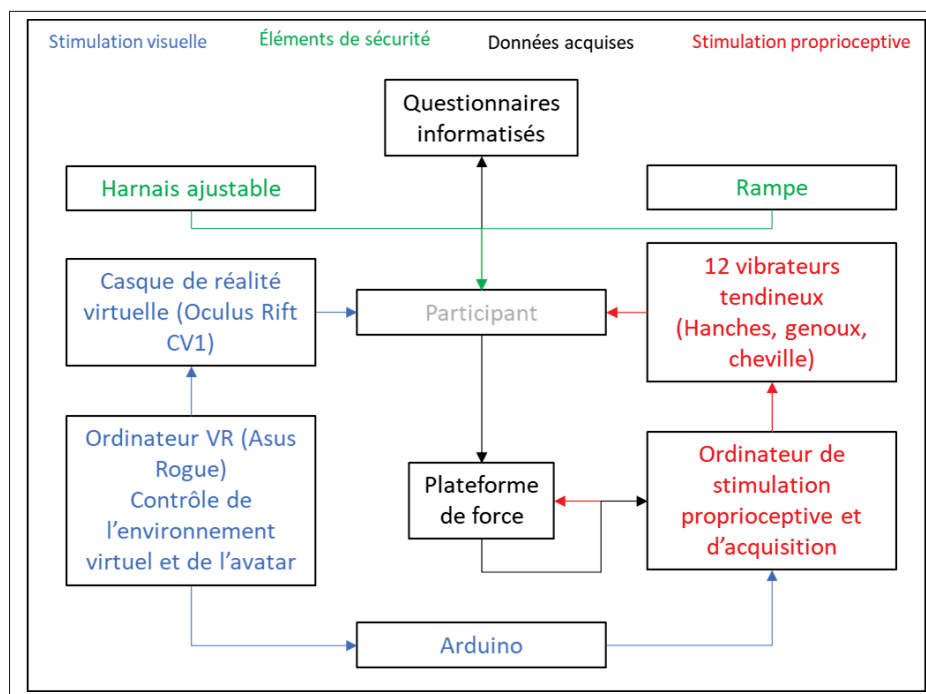


Figure 3.3 Schéma d'installation du matériel expérimental

Le participant est positionné debout au centre des plateformes de force et avait pour consigne de conserver un pied sur chaque bande. Les genoux sont déverrouillés, les bras peuvent être le long du corps ou balancer en rythme avec la marche de l'avatar. La tête de l'utilisateur est légèrement orientée vers le bas pour permettre de visualiser les membres inférieurs de l'avatar. Ils devaient aussi porter des chaussures dégageant les chevilles, mais cette consigne n'a pas pu être respectée en tout temps et a donc imposé que certains participants soient pieds nus. Pour la sécurité de l'utilisateur, une rampe était disposée à la droite du tapis roulant et il portait un harnais de sécurité ajustable qui ne fournissait pas de support de poids au cours de l'expérience (voir figure 3.4).

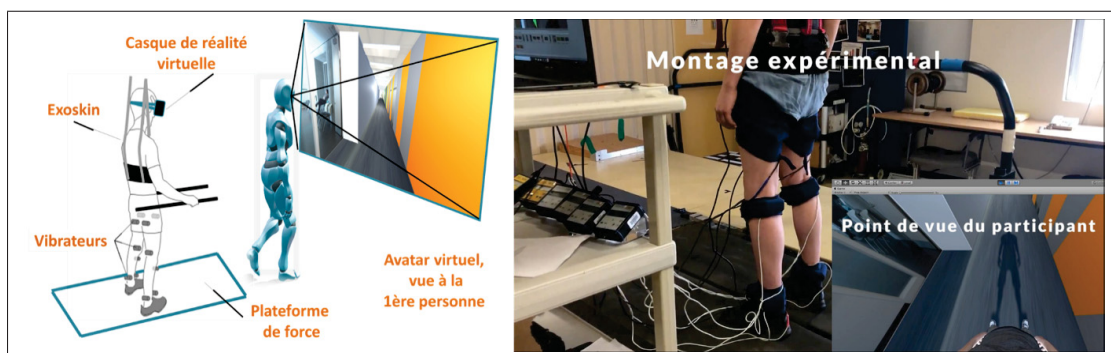


Figure 3.4 Montage expérimental : position du matériel, de l'utilisateur et de son champ visuel

3.3 Recrutement

Le recrutement s'est fait par courriels au sein des membres des structures de recherche du CRCHUM, de l'ÉTS et de l'IRGLM. Les critères d'inclusion visaient une population de 30 participants entre 18 et 35 ans, sans pathologie ou antécédent qui puissent affecter la marche ou les capacités sensorimotrices et n'ayant pas connaissance des conditions expérimentales. Les participants ont tous reçu une compensation de 30\$ pour leur collaboration.

3.4 Protocole

Une fois le consentement éclairé du participant signé et l'éligibilité vérifiée, les données caractéristiques des participants sont recueillies et rendues anonymes, à savoir : âge, genre, taille, poids, jambe dominante, antécédents médicaux et activités vidéoludiques. Le protocole expérimental s'appuie sur trois phases comportant chacune plusieurs tests ainsi qu'une pause entre les phases expérimentales II et III. Les deux premières phases consistent en une série de tests en « choix forcés avec alternatives » (2AFC), dix tests randomisés en phase I puis quatre en phase II, pour aboutir au classement des conditions expérimentales. La phase III implique cinq tests avec questionnaires présentés dans un ordre aléatoire avec un test par condition expérimentale. Il y a donc un total de 19 enregistrements par participant intégrant chacun les données physiologiques, les cinq questionnaires, le classement et les pointages en 2AFC ainsi que les données de force et de moment provenant des plateformes (voir figure 3.5). L'ensemble des consignes sont données au cours de l'installation du participant et sont répétées régulièrement pour s'assurer du maintien de la posture du corps, du champ visuel et éviter les actions volontaires autres que le mouvement des bras et de la tête, hors situation de déséquilibre important.

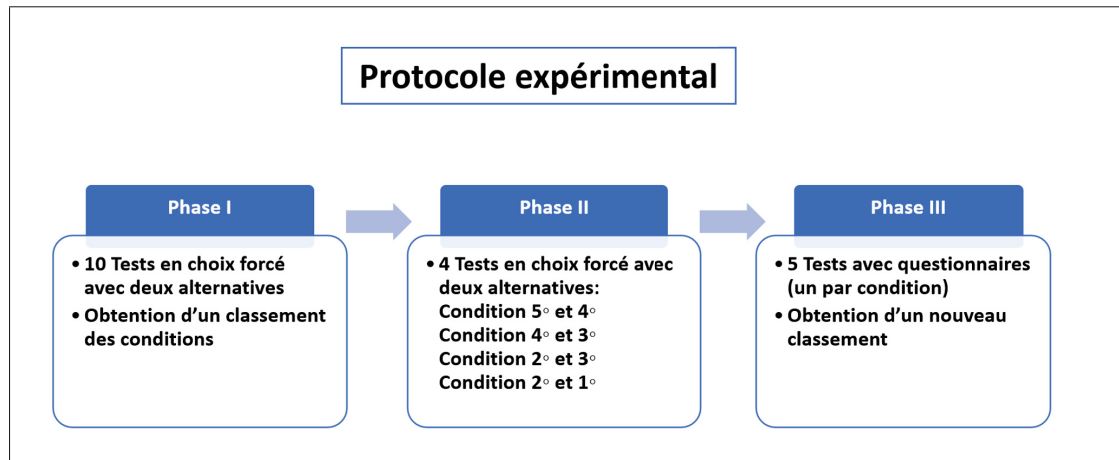


Figure 3.5 Protocole expérimental global avec ses trois phases d'acquisition

3.5 Conditions expérimentales

Cinq conditions expérimentales ont été créées pour permettre d'évaluer l'impact du degré de cohérence entre les stimulations visuelles et proprioceptives sur la perception de marche de l'utilisateur et son niveau d'incarnation alors qu'il demeure immobile et sans contrôle volontaire sur l'activité de ses membres inférieurs. Les conditions sont bâties autour de variation du degré de synchronisation temporel entre les stimulations visuelles et proprioceptives ainsi que l'usage des deux patrons de vibration créés. Aucune des conditions n'est expliquée au participant durant l'expérimentation. D'après nos hypothèses de recherche les cinq conditions se classent de l'incarnation et l'illusion de marche la plus forte à la plus faible comme il suit :

- synchronisée (SYN);
- retardée (RET);
- latéralisée (LAT);
- référence (REF);
- déphasée (DEP).

3.5.1 Condition de stimulation de référence

Cette condition constitue la ligne de base de cette expérimentation en offrant uniquement à l'utilisateur une stimulation visuelle. L'utilisateur debout en situation passive observe son avatar progresser dans le couloir virtuel sans vibration. Cette condition est censée donner une incarnation et une perception de marche moyennes et permettre de répondre à l'objectif principal grâce à un comparatif avec les autres conditions. Cette condition sera abrégée par les lettres REF, voir figure 3.6.

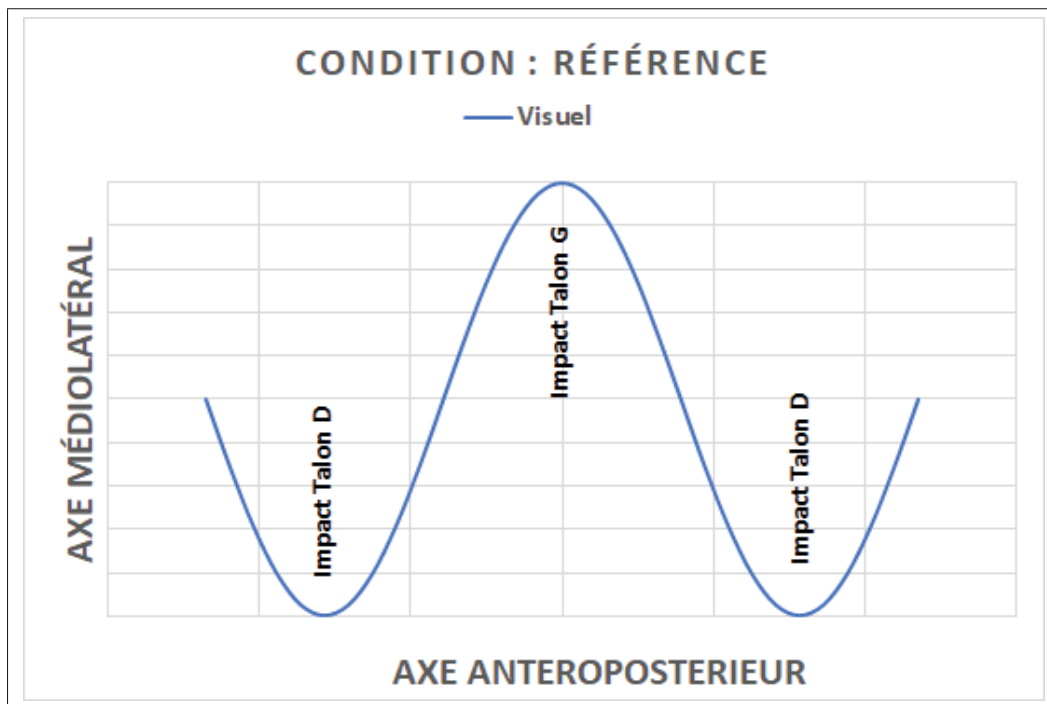


Figure 3.6 Schéma de synchronisation entre les afférences sensorielles en condition de référence (REF) donc sans retour proprioceptif

3.5.2 Condition de stimulations « synchronisée »

Cette condition représente la meilleure synchronisation spatiotemporelle possible des stimulations de cette expérimentation en offrant à l'utilisateur une stimulation visuelle et une stimulation proprioceptive s'appuyant sur le patron de marche réel préétabli, de façon synchronisée. Le participant debout en situation passive observe son avatar progresser dans le couloir virtuel avec des vibrations en adéquation. Cette condition sera abrégée par les lettres SYN, voir figure 3.7.

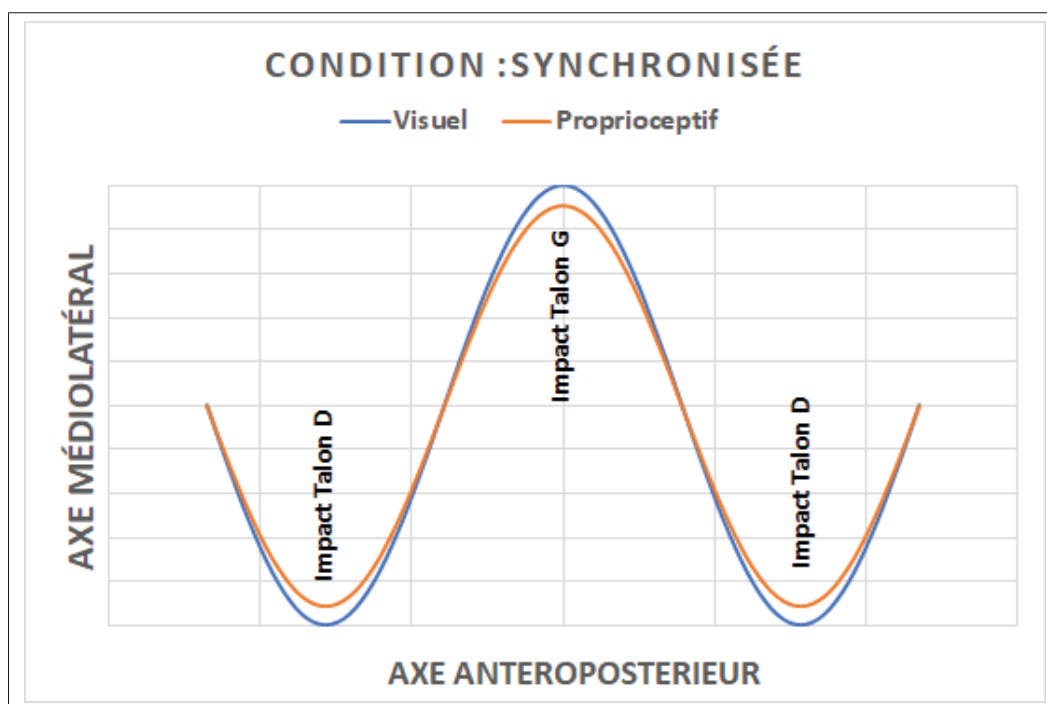


Figure 3.7 Trajectoire du centre de pression suggérée à l'utilisateur par l'ensemble des stimulations appliquées en condition synchronisée (SYN)

3.5.3 Condition de stimulations « retardée »

Cette condition représente une synchronisation spatiotemporelle décalée des stimulations de cette expérimentation en offrant à l'utilisateur une stimulation visuelle et une stimulation proprioceptive s'appuyant sur le patron de marche réel préétabli, avec un retard de 100 ms. Ce décalage n'est pas indiqué au participant, mais peut être perçu et potentiellement suffisant pour affecter la performance sans nuire au sentiment d'intentionnalité bien qu'il n'y ait pas d'action à mener (Franck et al., 2001 ; Lippi et al., 2010 ; Samaraweera, Perdomo et Quarles, 2015). Cette condition sera abrégée par les lettres RET, voir figure 3.8.

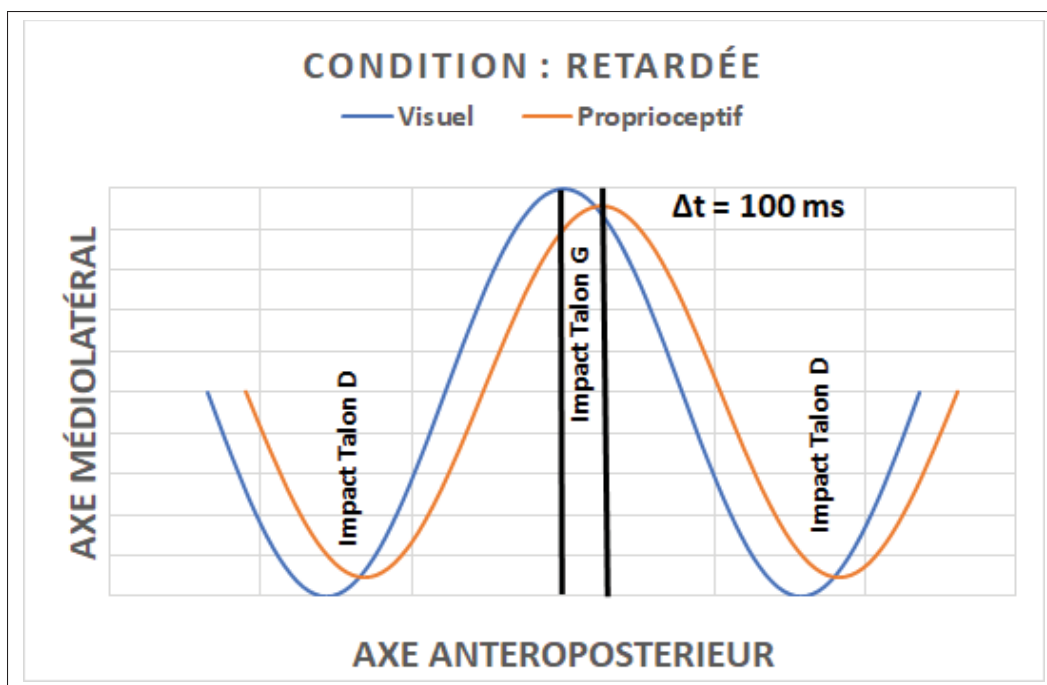


Figure 3.8 Schéma de synchronisation entre les afférences sensorielles en condition retardée (RET)

3.5.4 Condition de stimulations « déphasée »

Cette condition représente l'ajustement spatiotemporel le plus asynchrone possible entre les stimulations, en offrant à l'utilisateur une stimulation visuelle en totale opposition de phase avec la stimulation proprioceptive. La stimulation visuelle de marche et le patron de vibration des stimulations proprioceptives sont issus du même enregistrement de marche, mais toutes les stimulations proprioceptives appliquées à la jambe gauche apparaissent visuellement à la jambe droite et inversement. Cette condition sera abrégée par les lettres DEP, voir figure 3.9.

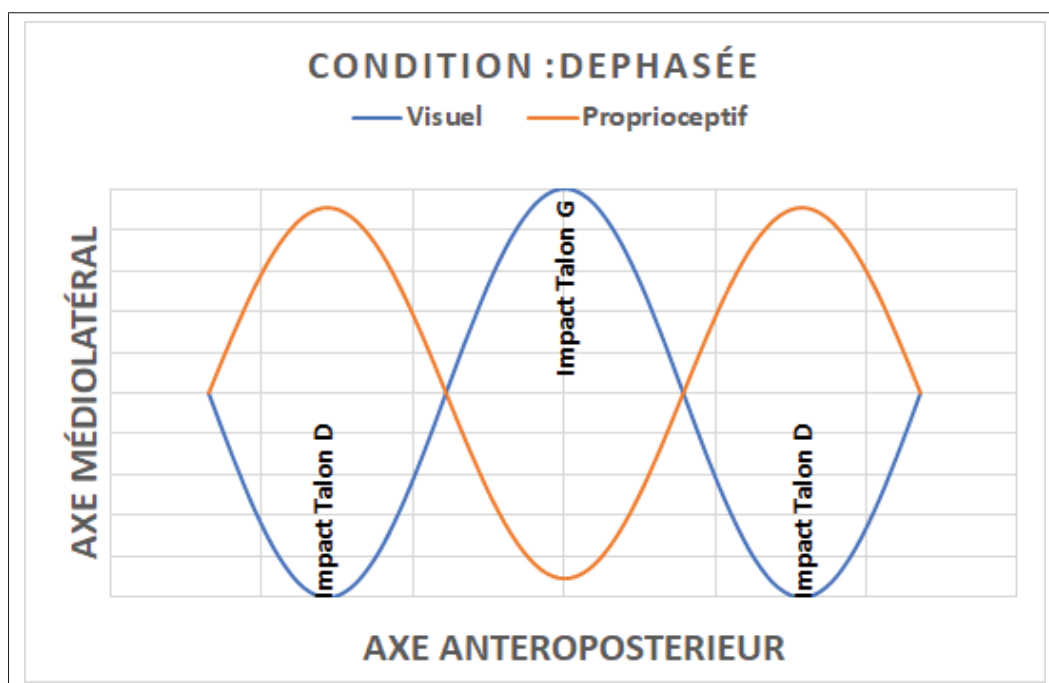


Figure 3.9 Schéma de synchronisation entre les afférences sensorielles en condition déphasée (DEP)

3.5.5 Condition de stimulations « latéralisée »

Cette condition propose des stimulations visuelles et proprioceptives synchrones où la stimulation proprioceptive induit une rythmique cohérente avec les impacts talon visible dans la réalité virtuelle au lieu d'un mouvement de marche. Le patron de vibration utilisé induit une réaction de fléchisseur et extenseur de la jambe d'appui en même temps et provoque ainsi une rigidité dans l'ensemble du membre inférieur en phase d'appui.

Cette condition sera abrégée par les lettres LAT, voir figure 3.10.

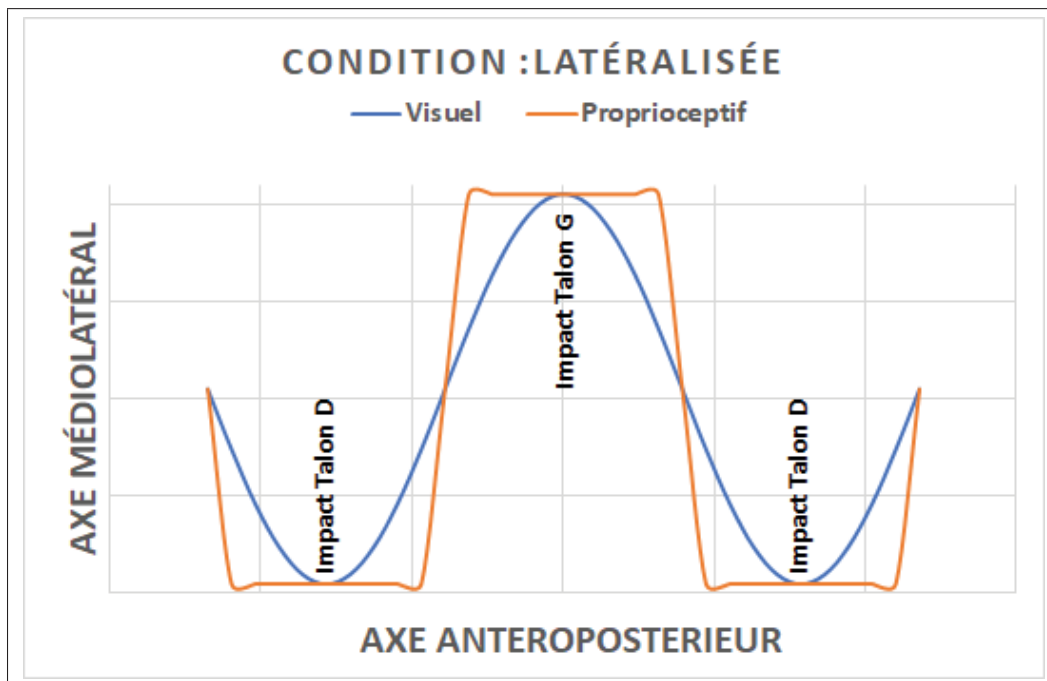


Figure 3.10 Schéma de synchronisation entre les afférences sensorielles en condition latéralisée (LAT)

3.5.6 Patrons de vibration

Dans le cadre de cette expérience, les 12 vibrateurs vibrent à 70 Hz lors de leur activation. Les limitations techniques liées aux vibrateurs rendent impossible l'activation de plus de six vibrateurs à la fois.

Les patrons de vibrations musculaires ont été réalisés à partir de l'analyse des angles articulaires de l'enregistrement cinématique de marche (hanche, genou, cheville). Chaque cycle de marche a été retranscrit grâce à Matlab 2018a et Mokka selon la figure 8 qui s'appuie sur les méthodes utilisées par Duclos et al. pour induire la perception proprioceptive de mouvements de flexion et d'extension propres à la marche (Duclos et al., 2014). Le logiciel d'analyse biomécanique Mokka a permis de mesurer les angles articulaires des hanches, des genoux et des chevilles de la séquence cinématique de marche acquise avec le système VICON. Ces données ont été stockées dans un fichier Excel puis utilisées dans Matlab 2018a pour créer des fichiers textes contenant les séquences de vibrations propres à chaque condition expérimentale pour qu'elles puissent être utilisables avec l'interface Labview. La retranscription consiste à définir la position temporelle de certains extremums observables au niveau des angles articulaires puis d'attribuer à cette position temporelle une activation ou une désactivation des vibrateurs pour créer une partition dans un fichier texte couvrant l'intégralité de la séquence de marche.

Quatre patrons de vibration sont utilisés durant l'expérimentation, les trois premiers se veulent réalistes en reposant sur les extremums des angles articulaires (explicité en figure 3.11 (Duclos et al., 2014)), mais sont associés à trois décalages temporels par rapport à l'enregistrement : + 0 ms (SYN), +100 ms (RET), 50% du cycle (DEP) qui correspond à une inversion entre les jambes stimulées. Le quatrième est une activation des 6 vibrateurs de la jambe d'appui à partir du moment de l'impact du talon jusqu'à l'impact de l'autre talon signifiant le transfert d'appui et donc l'activation des six autres vibrateurs (voir section : Conditions expérimentales). On notera qu'en théorie, la vibration vise l'instant où le muscle s'allonge au niveau des articulations ciblées (SYN), cet instant se voit décalé pour certaines conditions (RET, DEP).

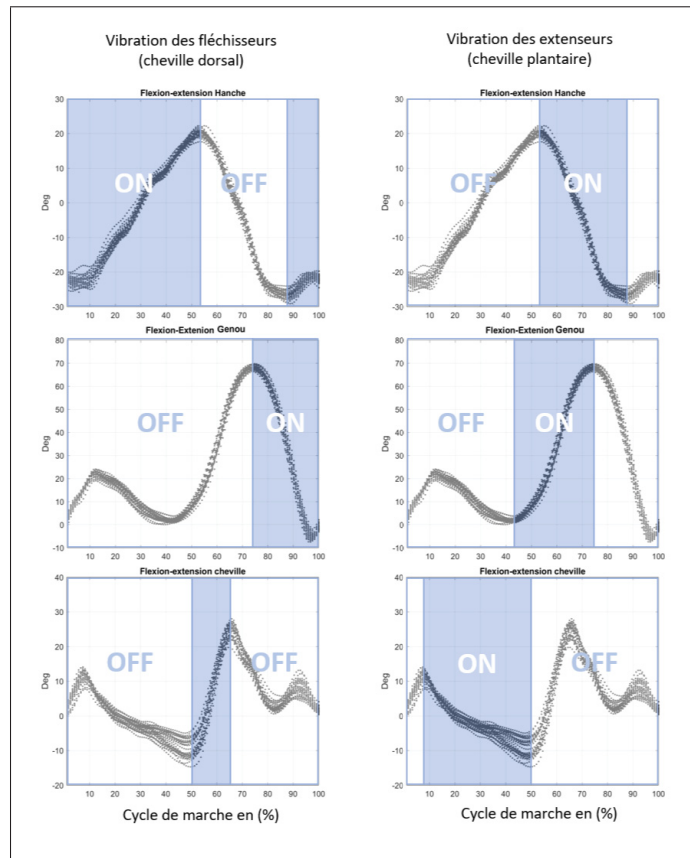


Figure 3.11 Cycles d'activation des six paires de vibrateurs en fonction des angles articulaires
Tirée de Duclos et al. 2014

On notera que ce n'est pas l'ensemble des extremums qui entraine une activation des vibrations en raison des limitations techniques des vibrateurs, à savoir un maximum de 6 vibrateurs actifs en même temps et que l'activation répétée avec des intervalles de temps inférieurs à 200 ms ne garantit pas l'atteinte de la fréquence ciblée. Les patrons des genoux et chevilles sont donc affectés par ces problématiques techniques et sont par conséquent simplifiés.

Les quatre retours proprioceptifs possibles seront identiques quel que soit le participant et d'une répétition à l'autre. Quel que soit le patron, le participant reçoit pour consigne de ne pas maintenir les genoux verrouillés, ne pas lutter, ni amplifier les effets de la vibration, et aucune information sur le type de vibration appliqué .

3.6 Choix forcé avec alternatives (2AFC) et questionnaire

Afin de pouvoir établir une classification et un comparatif efficace de chacune des conditions les unes par rapport aux autres, la méthode du choix forcé avec alternatives ou « two alternative forced choice » en anglais (2AFC) et un questionnaire ont été choisis en s'inspirant d'autres études (Terziman et al., 2012 ; Tajima et al., 2015). Un choix forcé avec alternatives consiste dans notre cas à présenter au participant successivement deux conditions distinctes et imposer la sélection de l'une ou l'autre des conditions expérimentales proposées selon un critère discriminatoire préalablement établi. Dans cette expérience, le critère discriminatoire est la perception de marche évaluée au travers de la question suivante : « Quelle stimulation vous a le plus donné l'impression que vos jambes effectuaient un mouvement de marche ? ».

3.6.1 Déroulement d'un test en 2AFC

Durant cette expérimentation, nous appellerons "test 2AFC" l'ensemble du processus impliquant la présentation d'une condition expérimentale (ou essai) suivie d'une courte pause puis d'une seconde condition expérimentale différente et la réponse du participant à la question discriminatoire (voir figure 3.12).

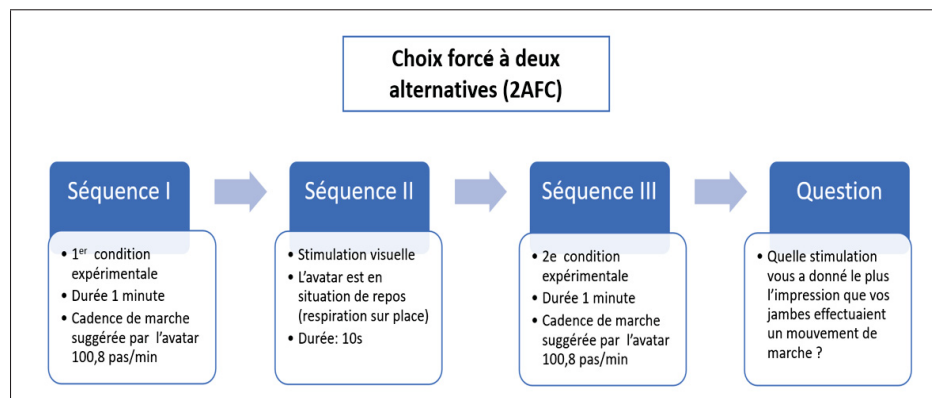


Figure 3.12 Déroulement d'un test en choix forcé avec deux options (« two alternative forced choice », abrégé 2AFC) pour les phases expérimentales I et II

3.6.2 Combinaisons de conditions pour le 2AFC, pointage et classification

Un test contient deux conditions expérimentales différentes que le participant doit départager au profit de celle offrant la plus forte impression de marche. De fait, l'appariement des conditions, l'ordre et le nombre d'apparitions de chaque condition ont une importance pour permettre la classification et donc les comparaisons entre conditions. Les combinaisons des tests sont élaborées à partir des dix combinaisons suivantes, dans l'ordre indiqué ou l'ordre inverse. Elles sont proposées de façon randomisée sauf pour la première condition du premier test qui est systématiquement la condition de référence (REF) pour faciliter l'adaptation du participant. Dix couples possibles, soit dix 2AFC à réaliser devaient être évalués pour comparer équitablement chaque condition l'une avec l'autre : REF-SYN, REF-RET, REF-DEP, REF-LAT, SYN-RET, SYN-DEP, SYN-LAT, RET-DEP, RET-LAT, DEP-LAT.

Chaque condition apparaît donc quatre fois durant la phase I. Afin de faciliter les comparaisons entre conditions, un système de pointage est établi. Lorsqu'une condition est choisie par le participant lors d'un test 2AFC, elle obtient 1 point et marque zéro point en cas contraire. Cela signifie qu'une condition peut marquer entre 0 et 4 points par participant, soit 0 à 120 points sur une population de 30 participants. Un classement est alors établi pour chaque participant en se basant sur le pointage obtenu. Plus le pointage attribué par le participant est élevé en fonction de leur perception, meilleure devrait être l'illusion de marche induite par la condition. Toutefois, les égalités sont possibles et sont conservées pour ne pas altérer l'analyse des résultats ou démultiplier le nombre de tests requis.

3.6.3 Déroulement d'un test avec questionnaire

Des tests avec questionnaires sont utilisés dans cette expérience. Contrairement aux tests en 2AFC, les tests avec questionnaires ne comparent pas deux conditions, mais évaluent une seule condition sur l'incarnation et la perception de marche induite. Le déroulement d'un test contient donc la séquence de stimulation choisie aléatoirement suivie de questions subjectives toujours présentées dans le même ordre (voir figure 3.13). Chaque condition est évaluée une

fois sur l'ensemble des dix questions pour constituer un test avec questionnaire, ce processus a lieu cinq fois par participant pour compléter la phase III du protocole.

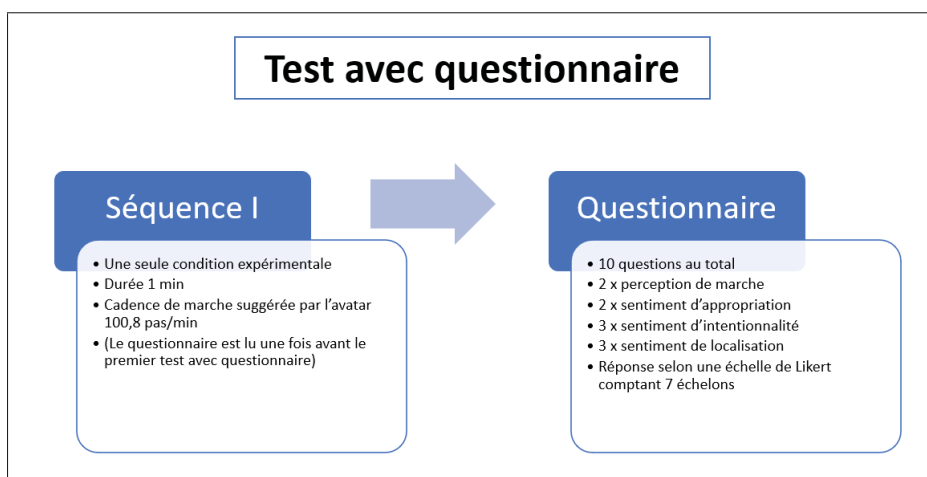


Figure 3.13 Déroulement d'un test avec questionnaire en phase III

3.6.4 Questionnaire utilisé

Les réponses possibles au questionnaire sont présentées sous la forme d'échelle chiffrée de 1 à 10 pour la première où 1 signifie « pas du tout d'accord » et 10 « Complètement ». Les neuf autres questions fonctionnent selon une échelle de Likert allant de 1 à 7 où 1 correspond à l'évaluation subjective « pas du tout d'accord » avec l'affirmation proposée tandis que 7 signifie « tout à fait d'accord » avec l'affirmation proposée (voir figure 3.14). Les questionnaires ont été remplis par le participant directement sur la tablette prévue à cet effet.

Le questionnaire d'évaluation de l'incarnation s'inspire des travaux de Mar Gonzales et al. pour les questions 1 à 8, les questions ont été traduites de l'anglais vers le français et la perception de marche a été évaluée avec deux questions similaires (0 et 9) qui ont été choisies dans le cadre de cette expérience (voir tableau 3.15).

<p>À quel point aviez-vous l'impression de marcher ? Zéro correspondant à "pas du tout" et dix "complètement". *</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 9 10</p> <p><input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/></p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pointage de la réponse</th> <th>Énoncé correspondant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Pas du tout d'accord</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>pas d'accord</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>un peu pas d'accord</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Ni d'accord ni pas d'accord</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Un peu d'accord</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>D'accord</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Tout à fait d'accord</td> </tr> </tbody> </table>	Pointage de la réponse	Énoncé correspondant	1	Pas du tout d'accord	2	pas d'accord	3	un peu pas d'accord	4	Ni d'accord ni pas d'accord	5	Un peu d'accord	6	D'accord	7	Tout à fait d'accord
Pointage de la réponse	Énoncé correspondant																	
1	Pas du tout d'accord																	
2	pas d'accord																	
3	un peu pas d'accord																	
4	Ni d'accord ni pas d'accord																	
5	Un peu d'accord																	
6	D'accord																	
7	Tout à fait d'accord																	
<p>1. J'avais la sensation que le corps virtuel était mon propre corps: *</p> <p>1 2 3 4 5 6 7</p> <p>Pas du tout d'accord <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Tout à fait d'accord</p>																		

Figure 3.14 Apparence du questionnaire utilisé et pointage associé

Numéro	Questions	Échelle de Likert	Type d'information
0	À quel point aviez-vous l'impression de marcher ? Zéro correspondant à "pas du tout" et dix "complètement".	1 à 10	Impression de marcher
1	1. J'avais la sensation que le corps virtuel était mon propre corps:	1 à 7	Appropriation (ownership)
2	2. Il m'a semblé que j'avais plus d'un corps:	1 à 7	Appropriation (ownership)
3	3. J'avais la sensation que je pouvais contrôler le corps virtuel comme si c'était mon propre corps:	1 à 7	Intentionnalité (Agency)
4	4. Les mouvements du corps virtuel étaient causés par mes mouvements:	1 à 7	Intentionnalité (Agency)
5	5. J'avais la sensation que le corps virtuel bougeait de lui-même:	1 à 7	Intentionnalité (Agency)
6	6. J'avais la sensation que mon corps était situé là où je voyais le corps virtuel:	1 à 7	Localisation (Location)
7	7. J'avais la sensation d'être à l'extérieur de mon corps:	1 à 7	Localisation (Location)
8	8. J'avais la sensation que mon corps (réel) se déplaçait vers le corps virtuel ou que le corps virtuel se déplaçait vers mon corps (réel):	1 à 7	Localisation (Location)
9	9. J'avais la sensation de marcher:	1 à 7	Impression de marcher

Figure 3.15 Questions utilisées dans le questionnaire sur l'incarnation et la perception de marche

Chaque question se rapportant à l'incarnation (appropriation, localisation et intentionnalité) est étudiée en regroupant les questions par sous-composante de l'incarnation afin de faciliter l'interprétation. Un score d'incarnation total est aussi calculé pour chaque condition sur la base des réponses aux questions 1 à 8 avec ici un score maximal de 32 (Gonzalez-Franco et Peck, 2018) :

$$\text{SCORE} = Q1 - Q2 + Q3 + Q4 - Q5 + Q6 - Q7 + Q8 \quad (3.1)$$

3.7 Analyse du centre de pression : CdP

À l'aide des données de force et de moment collectées par les deux plateformes de force du tapis roulant instrumenté ont été déterminées :

- les déplacements moyens antéropostérieurs (AP) et médiolatéraux (ML) ;
- l'aire couverte par le CdP à l'aide de la méthode Convex Hull ;
- l'amplitude d'oscillation correspondant à la fréquence seuil de 0.84 Hz (Schumann et al., 1995).

3.7.1 Analyse de la position du CdP

Pour obtenir la position instantanée et centrée du CdP selon X (axe médiolatéral) et Y (axe antéropostérieur), le processus suivant a été utilisé :

- transformation des données de moments et forces des plateformes en coordonnées des déplacements AP (axe antéropostérieur) et ML (axe médiolatéral). Formule pour déterminer la position du centre de pression d'un pied (Bertec, 2011) :

$$\delta_z = 0,015 \quad (3.2)$$

$$CP_x = \frac{-\delta_z \cdot F_x - M_z}{F_z} \quad (3.3)$$

$$CP_y = \frac{-\delta_z \cdot F_x + M_z}{F_z} \quad (3.4)$$

Formule pour déterminer la position médiolatérale du CdP global (Schepers, 2009) et (Winter, 1995) :

$$CP_X = \frac{CP_{x,gauche} \cdot F_{z,gauche} + CP_{x,droit} \cdot F_{z,droit}}{F_{z,gauche} + F_{z,droit}} \quad (3.5)$$

Formule pour déterminer la position antéropostérieure du CdP global (Schepers, 2009) et (Winter, 1995) :

$$CP_Y = \frac{CP_{y,gauche} \cdot F_{z,gauche} + CP_{y,droit} \cdot F_{z,droit}}{F_{z,gauche} + F_{z,droit}} \quad (3.6)$$

- troncature pour éliminer les cinq premières et cinq dernières secondes de chaque condition testée pour obtenir des enregistrements de 50 000 frames sur 50 secondes ;
- application du filtre sgolayfilt (ordre 2, fenêtre : 499 frames) ;
- l'ensemble des essais réalisés par le participant sont triés par condition dans des tableaux distincts contenant cinq répétitions (les quatre premières et la dernière) de 50 000 frames ;
- on crée des courbes de déplacement AP et ML de 50 000 points par condition ou chaque point est obtenu à partir de la position moyenne par frame sur l'ensemble des essais ;
- on calcule la position moyenne sur l'ensemble des 50 000 points puis on la soustrait à l'ensemble des positions instantanées pour centrer en (0,0) le signal selon les deux axes. Cela a pour fonction de faciliter les comparaisons et calculs impliquant plusieurs signaux ;
- une fois les données centrées en (0,0), on supprime les points distants de plus de trois écarts types du centre (voir figure 20) pour conserver un maximum de données tout éliminant les déplacements anormaux enregistrés par le tapis roulant. On suppose ici une répartition normale des données pour utiliser l'approche 6 sigma.

Le calcul des déplacements moyens pour chaque condition sur l'ensemble de la population, soit environ 190 à 210 répétitions par condition, permet d'aboutir à la figure 4.8. De la même façon, les 7 étapes énoncées précédemment servent de base aux calculs de l'aire couverte par le CdP, de la fréquence et de l'amplitude , mais ne seront pas indiquées bien qu'elles soient nécessaires.

3.7.2 Analyse de l'aire

L'analyse de l'aire de chaque condition a été réalisée selon le processus suivant :

- triage des essais en fonction des conditions expérimentales testées ;
- calcul de l'aire moyenne et de l'écart type obtenu pour chaque condition sur l'ensemble de la population (190 à 210 répétitions en fonction des conditions). On utilise pour cela les données de déplacement ainsi que les fonctions Matlab `convhull(X, Y)` pour déterminer les points constituant le contour de la surface couverte par le CdP puis on applique `polyarea (résultat(X), résultat(Y))` sur l'ensemble des coordonnées des points constituant le contour de la surface pour obtenir l'aire couverte par les déplacements du CdP ;
- tous les résultats obtenus sont alors convertis de cm^2 vers les dm^2 , puis présentés en dm^2 , voir la figure 4.10.

3.7.3 Analyse des fréquences et amplitudes

Le processus suivant a permis d'établir l'amplitude maximale d'oscillation et la fréquence correspondante pour chaque répétition d'une condition puis l'analyse de l'amplitude correspondant à une fréquence seuil de 0,84 Hz :

- triage des essais en fonction des conditions expérimentales testées et de l'axe de déplacement ;
- on applique la Transformée de Fourier sur chacun de essais à l'aide de la fonction `fft(signal)` pour pouvoir construire un graphique des amplitudes d'oscillation en fonction des fréquences présentes dans l'essai. Une première analyse permet de relever l'ensemble des couples (amplitude, fréquence) en faisant en sorte que l'amplitude soit la plus élevée et que la fréquence soit supérieure à une limite arbitraire de 0,1 Hz ce qui représente un évènement

se produisant approximativement toutes les 10 secondes ;

- l'ensemble des couples (amplitude, fréquences) sont triés par condition et axe d'oscillation, faisant apparaître la fréquence de 0,84 Hz comme une fréquence seuil après laquelle l'amplitude d'oscillation ne peut que diminuer. Or cette valeur correspond à la fréquence de marche suggérée par les stimulations ;
- les couples (amplitude, fréquence) sont analysés pour déterminer les effectifs de couples par condition et axe ayant une fréquence supérieure ou égale à la limite arbitraire de 0,72 Hz soit 15% inférieure au seuil établi précédemment. Cela permet de faire ressortir les conditions induisant les oscillations avec les plus fortes amplitudes et une fréquence supérieure à 0,72 Hz et, dans quelle mesure chaque condition tend à produire ces oscillations ;
- une seconde analyse sur l'ensemble des amplitudes d'oscillations à 0,84 Hz issues des graphiques (amplitude, fréquence) précédemment établi permet de faire ressortir l'impact des conditions sur l'amplitude des réponses aux stimulations. Seuls les résultats de cette seconde analyse sont présentés à la figure 4.11.

3.8 Méthode d'analyse statistique

Pour l'analyse de données qualitatives provenant d'une échelle de Likert ou du 2AFC (pointage en 2AFC, scores de perception de marche, score total d'incarnation) et de données quantitatives provenant de l'analyse du CdP (aire, amplitude d'oscillation), il a été choisi d'utiliser des ANOVAs sur un facteur à mesure répétée avec un seuil significatif $p < 0,05$. Le facteur était la condition expérimentale et la répétition correspondait au résultat de chacune des cinq conditions pour un type de données appartenant à un participant. Chaque question du questionnaire a été testée individuellement ainsi que les scores d'incarnation, les pointages en 2AFC et toutes les données reliées au CdP. La population cible compte 30 individus et les études tendent à confirmer la validité de ces tests sur les données qualitatives issues d'échelles de Likert (Nor-

man, 2010; Sullivan et Artino, 2013). Ensuite, une analyse post-hoc classique des moyennes et intervalles avec un test Tukey HSD à 95% a été utilisée pour chaque différence significative mise en avant afin de déterminer quelles étaient les ou les combinaisons de conditions ayant une différence statistique significative. L'ensemble de l'analyse statistique a été faite avec Statgraphics 18 et GraphPad Prism 8. On signalera la valeur de p au sein de graphique tel que **** implique p inférieur à 0,0001 , *** pour p inférieur à 0,001 , ** pour p inférieur à 0,01 , * pour p inférieur à 0,05 et ns pour indiquer une différence non significative.

3.9 Résumé des données analysées

Pour pouvoir étudier les cinq conditions expérimentales créées, répondre à notre objectif et vérifier nos hypothèses, plusieurs données ont été analysées :

- données caractéristiques de la population ;
- résultat du pointage en 2AFC obtenu par chaque condition durant la phase I ;
- résultat du 2AFC obtenu par chaque combinaison de condition durant la phase I ;
- réponses aux questions sur l'incarnation et la perception de marche pour chaque condition ;
- score total d'incarnation ;
- comportement du centre de pression de l'utilisateur par condition et axe (AP et ML) : aire couverte et amplitude moyenne d'oscillation.

Les résultats du pointage obtenu durant le 2AFC correspondent aux réponses données par les participants lors de la phase expérimentale I et compilent donc les résultats de 300 tests 2AFC réalisés sur 30 participants, soit 120 répétitions par condition. Chaque condition peut obtenir un maximum de 120 points qui est présenté sous forme de pourcentage. Concernant les résultats par combinaison, ils mettent en avant les relations entre conditions sans tenir compte d'un quelconque effet d'ordre. Les résultats présenteront le pourcentage de points attribués durant le 2AFC à chaque élément d'une paire pour les dix combinaisons possibles. Chaque combinaison a été présentée 30 fois sans tenir compte de l'ordre des conditions au sein des paires.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 Caractéristiques démographiques

Cette étude a inclus 30 participants n'ayant aucune pathologie ou antécédent qui puissent affecter leur marche naturelle (blessure, chirurgie, grossesse, etc.). Elle compte 16 hommes et 14 femmes, situés entre 21 et 32 ans avec une moyenne d'âge de 24,8 ans et un écart type de 3,0 ans. Les participants pèsent en moyenne 70,5 kg avec un écart type 12,8 kg et mesurent en moyenne 1,7 m avec un écart type de 0.1 m. Huit participants ont une dominance jambe gauche et 7 jouent à des jeux vidéo plusieurs fois par semaine ou chaque jour, les autres jouent une fois par mois ou moins.

L'ensemble des participants a réalisé les trois phases expérimentales et a été exposé aux cinq conditions de stimulations proposées de façon randomisée entre six et huit fois pour chaque condition.

4.2 Données subjectives sur la perception de marche et le sentiment d'incarnation

L'ensemble des données subjectives contient les résultats des pointages en 2AFC, les réponses aux questionnaires et le score total d'incarnation.

4.2.1 Résultats du 2AFC

Les résultats du 2AFC démontrent une importante différence entre la condition REF et les quatre autres conditions impliquant des vibrations (SYN, RET, DEP, LAT), voir figure 4.1. REF est choisie dans seulement 20% des cas durant le 2AFC tandis que les autres conditions obtiennent un score entre 49,2% et 64,2% où LAT, RET, SYN, DEP décrit l'ordre décroissant des conditions en fonction de la perception de marche suscitée.

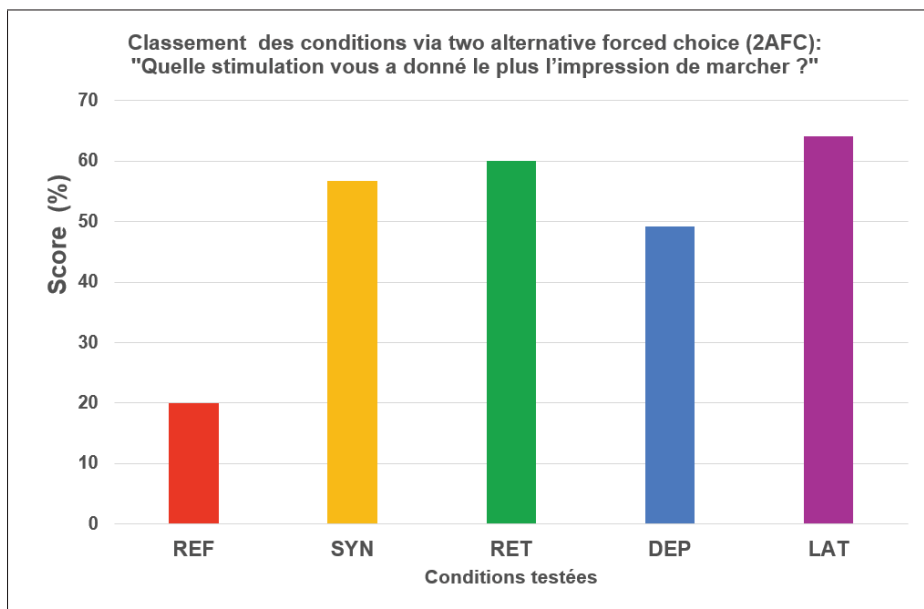


Figure 4.1 Résultats des pointages obtenus en 2AFC pour chaque condition

4.2.2 Résultats par combinaison de conditions du 2AFC

La figure 4.2 illustre la répartition des points du 2AFC, mais cette fois selon chaque combinaison possible. Ces résultats mettent en avant deux tendances, soit la combinaison est relativement équilibrée avec un rapport proche du 60-40, soit elle est fortement déséquilibrée avec un ratio approximatif de 80-20. La condition REF est choisie dans 17 à 20% des cas quelle que soit la seconde condition et il en va de même pour la condition DEP qui obtient 27% face à RET. En accord avec le graphique précédent, LAT domine dans l'ensemble des combinaisons. Toutefois, les combinaisons de conditions SYN, RET, DEP et LAT respectent toutes la première tendance, (60-40) à l'exception du couple RET-DEP (73-27). On notera que dans tous les cas les conditions avec vibration dominant fortement. Parmi les diverses vibrations appliquées, celles-ci semblent toutes être perçues de façon semblable, plus particulièrement les couples SYN-RET et SYN-DEP.

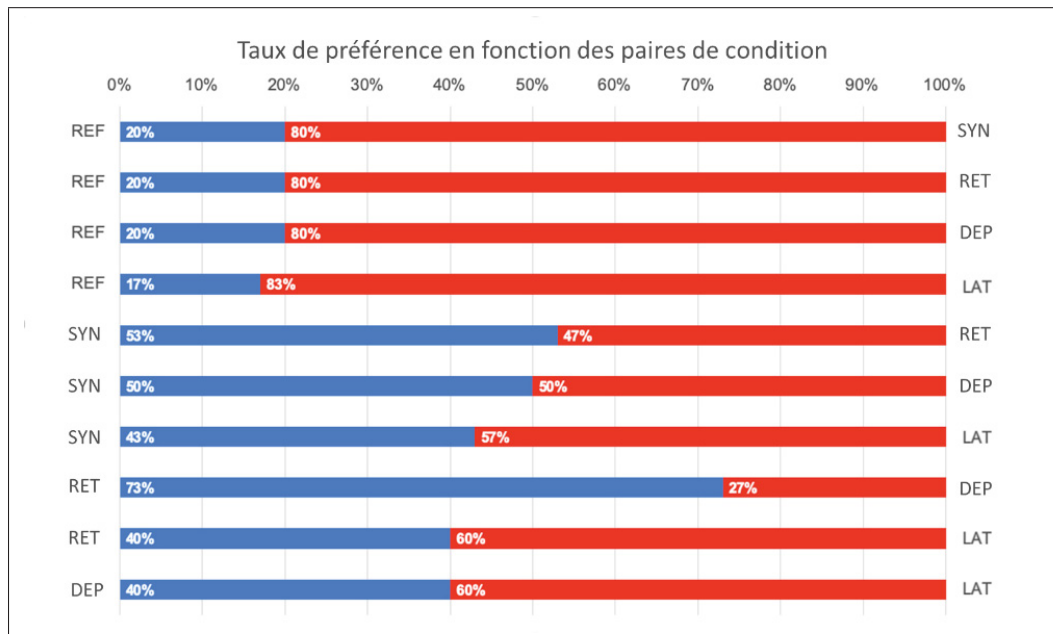


Figure 4.2 Répartitions des pointages en fonction des paires des conditions testées

4.2.3 Résultats des questionnaires

Les prochains résultats présentent les résultats des questions en les groupant selon quatre catégories : impression de marche, sentiment d'appropriation, sentiment d'intentionnalité et sentiment de localisation.

4.2.3.1 Impression de marche

Les résultats des questionnaires concernant la perception de marche indiquent qu'il existe une différence significative entre la condition REF et chacune des quatre autres conditions ($p < 0,0001$). Les scores tendent à montrer que la condition LAT produit une perception de marche plus importante bien qu'il n'y aucune différence significative entre les conditions SYN, RET, DEP et LAT ($p > 0,4717$). La perception globale de marche est moyenne avec des scores de 6,2 à 7,1/10 pour Q0 et 4,7 à 5,3/7 pour Q9, voir figure 4.3.

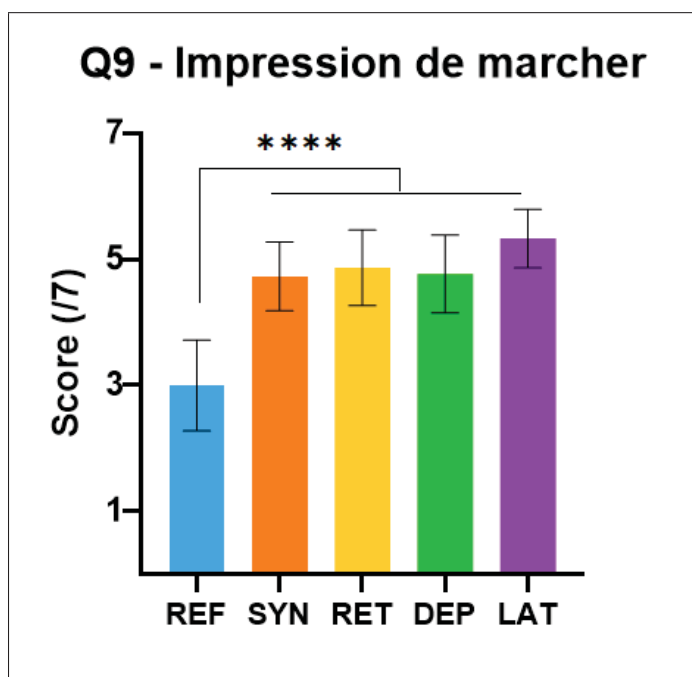


Figure 4.3 Scores moyens des conditions pour la question Q9 (résultats identiques à Q0) - Phase III

4.2.3.2 Sentiment d'appropriation

La figure 4.4 présente de légères différences entre les conditions concernant le de sentiment d'appropriation, mais aucune différence significative n'est observable sur les questions Q1 et Q2, on obtient $p = 0,2501$ et $F=1,366$.

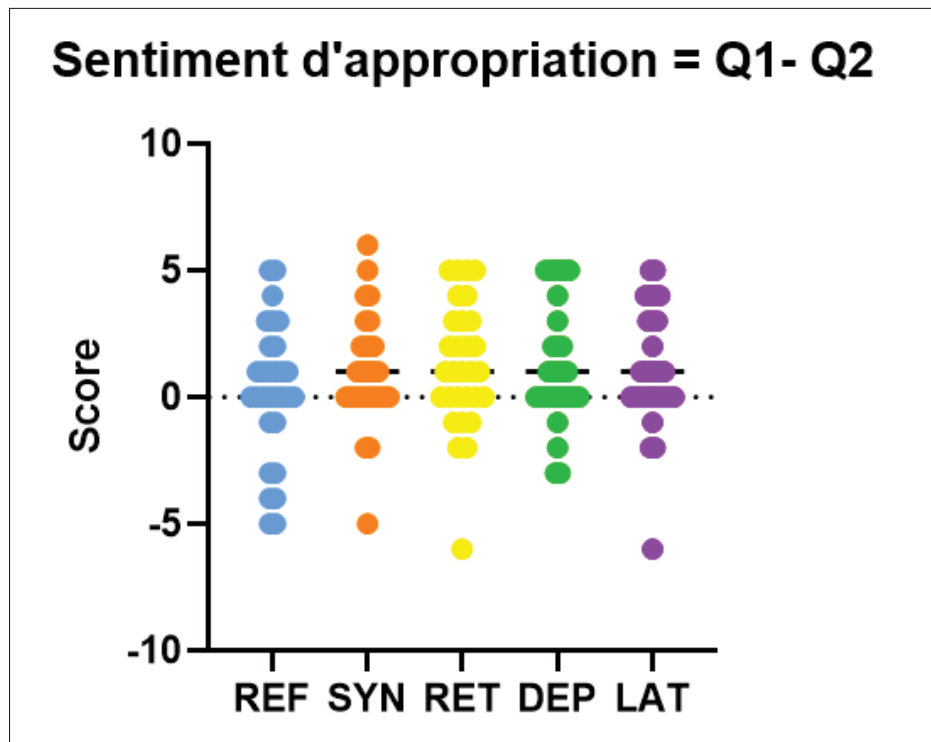


Figure 4.4 Scores moyens des conditions pour les questions Q1 et Q2 - Phase III

4.2.3.3 Sentiment d'intentionnalité

La figure 4.5 présente de légères différences entre les conditions au niveau du sentiment d'intentionnalité avec une différence significative $p < 0,0359$, on observe une différence significative entre REF et LAT à la question Q3 avec $p = 0,018$ et quatre autres différences significatives entre REF et chacune des autres conditions avec $p = 0,0007$ pour la question Q5. On observe un sentiment d'intentionnalité assez faible.

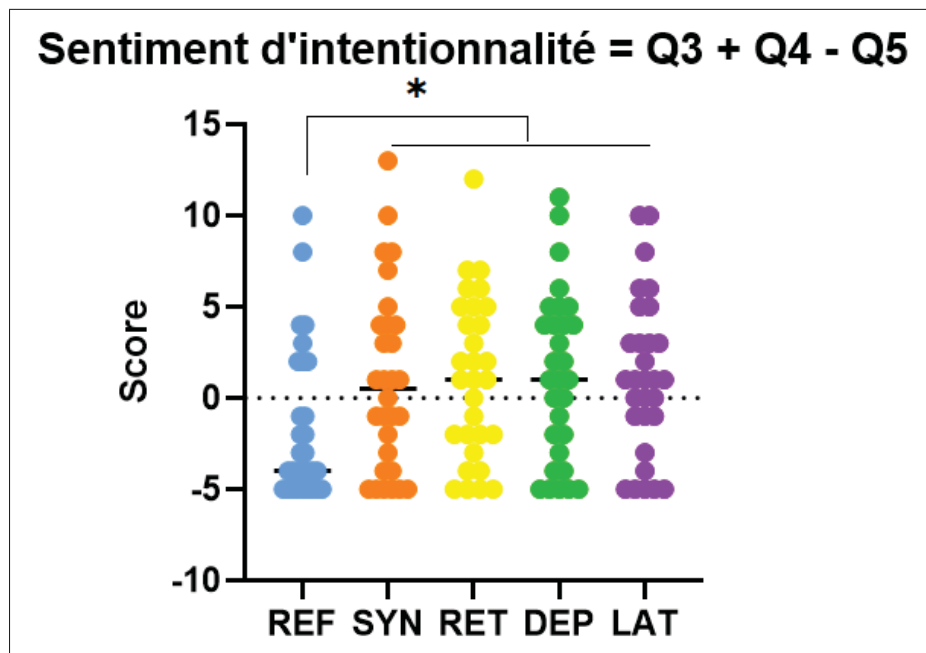


Figure 4.5 Scores moyens des conditions pour les questions Q3, Q4 et Q5 - Phase III

4.2.3.4 Sentiment de localisation

La figure 4.6 représente les résultats des questions Q6, Q7 et Q8. Ces résultats tendent à décrire un sentiment de localisation assez important et relativement constant, quelle que soit la condition testée. Aucune différence significative n'a été établie entre les conditions pour ces trois questions, on obtient $p = 0,1416$ et $F = 1,760$.

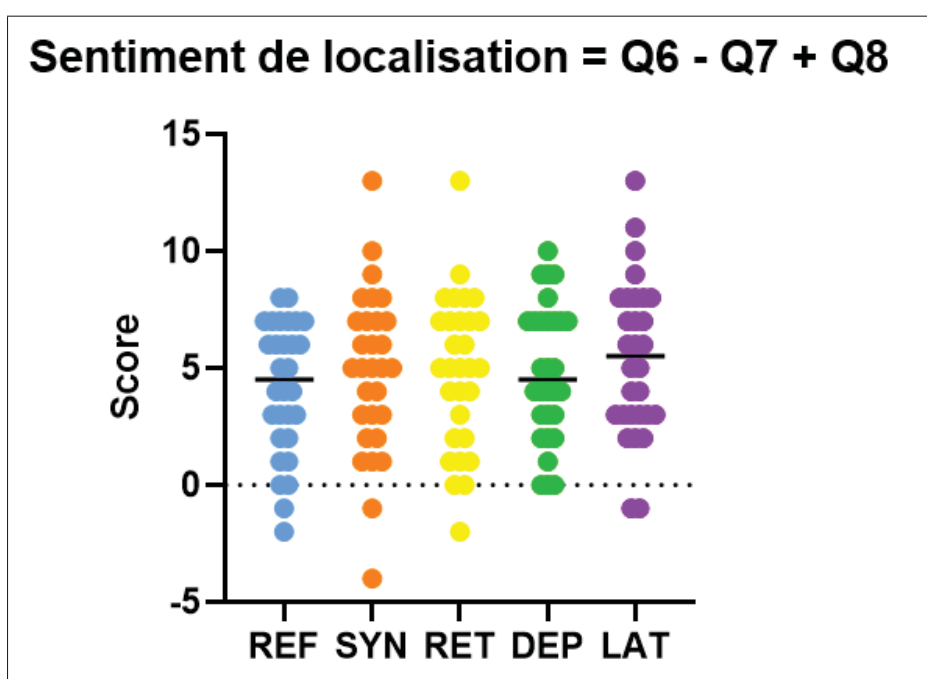


Figure 4.6 Scores moyens des conditions pour les questions Q6, Q7 et Q8 - Phase III

4.2.4 Résultats du score total d'incarnation

Les résultats des scores d'incarnation totaux de la figure 4.7 démontrent une importante variabilité aux vues des écarts types et attestent d'un sentiment d'incarnation pour l'ensemble des conditions faible avec des scores allant de 2,8 à 7,5 sur 32. La condition REF produit le plus faible sentiment d'incarnation et démontre un comportement significativement différent avec trois des quatre autres conditions telles que $p < 0,0254$ et $p = 0,0604$ pour REF-SYN.

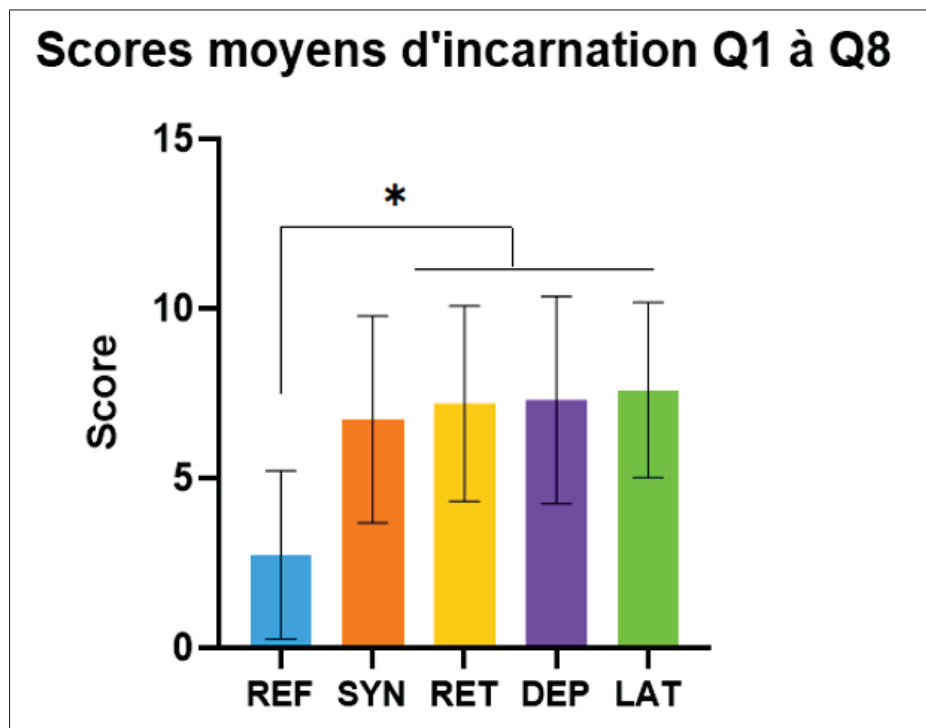


Figure 4.7 Scores d'incarnation moyens des conditions - Phase III

4.3 Données sur le centre de pression

Dans les sections suivantes seront présentées les données concernant les déplacements moyens du CdP sur l'ensemble de la population, l'aire couverte par les déplacements du CdP ainsi que les amplitudes d'oscillation liées aux courbes de déplacement au cours du temps.

4.3.1 Déplacements moyens AP et ML sur l'ensemble de la population

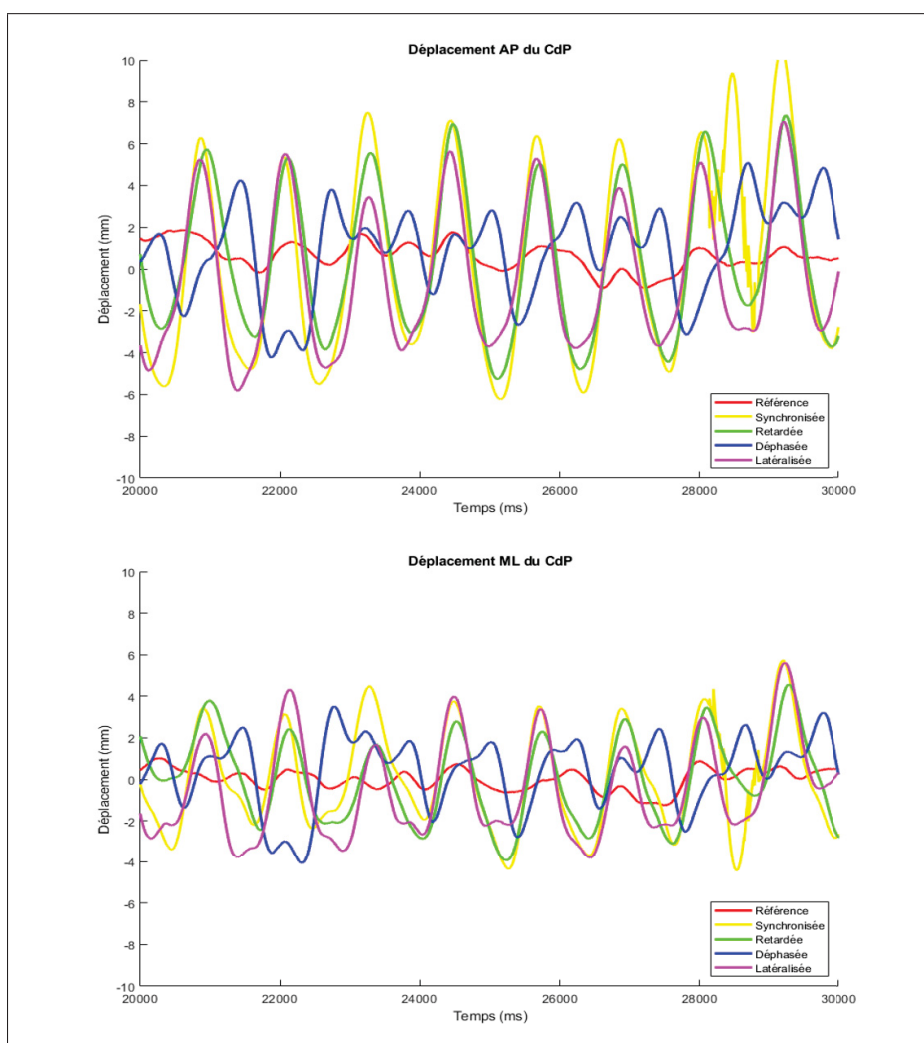


Figure 4.8 Scores d'incarnation moyens des conditions - Phase III

La figure 4.8 présente le résultat des déplacements moyens du centre de pression global selon les axes AP et ML pour chaque condition sur 30 participants. On observe des oscillations très nettes avoisinant la fréquence de 0,84 Hz soit 100,8 pas/min. On observe aussi des oscillations plus importantes en AP, les oscillations varient peu en amplitude au cours de temps pour les conditions SYN, RET, DEP, LAT. De plus, SYN et LAT apparaissent synchrones tandis que RET affiche un léger retard sur ceux-ci. Enfin, DEP présente une réponse double, une forte réponse oscillatoire d'amplitude inférieure et en déphasage complet avec SYN et LAT, et une réponse plus faible encore, mais cette fois en phase avec les deux autres conditions.

4.3.2 Aire couverte par le CdP

La figure 4.9 présente le résultat type de l'aire couverte par les déplacements de son CdP pour un participant en fonction des conditions effectuées durant l'expérience. On y distingue clairement l'évolution du mouvement oscillatoire selon la condition.

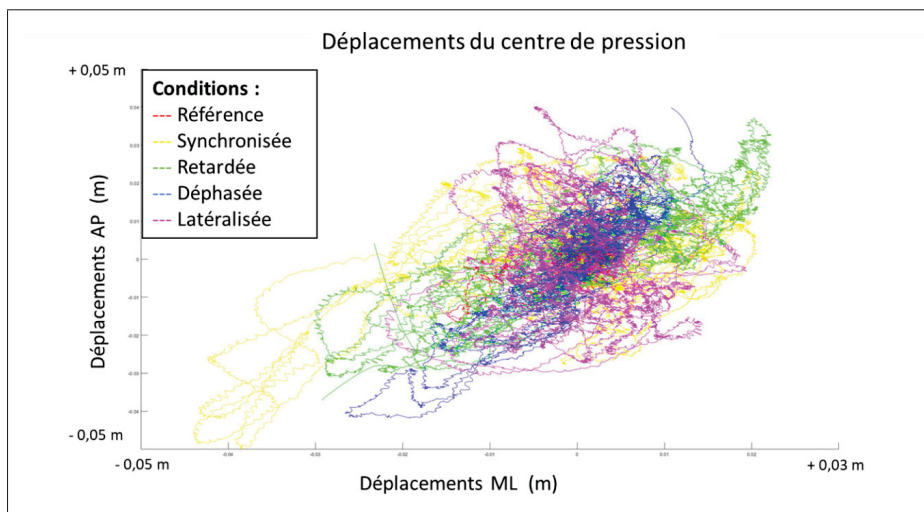


Figure 4.9 Déplacements du centre de pression au cours du temps pour le participant 1 pour la dernière répétition de chaque condition

La figure 4.10, représentant les aires couvertes par les déplacements du CdP, démontre une surface beaucoup plus étendue dans le cas des conditions avec vibration (SYN, RET, DEP, LAT), pratiquement deux fois supérieure. REF est significativement différente de chacune des autres conditions ($p < 0,0001$) tandis qu'il n'y a aucune différence significative entre les quatre autres conditions (0,64 à 0,75 cm²).

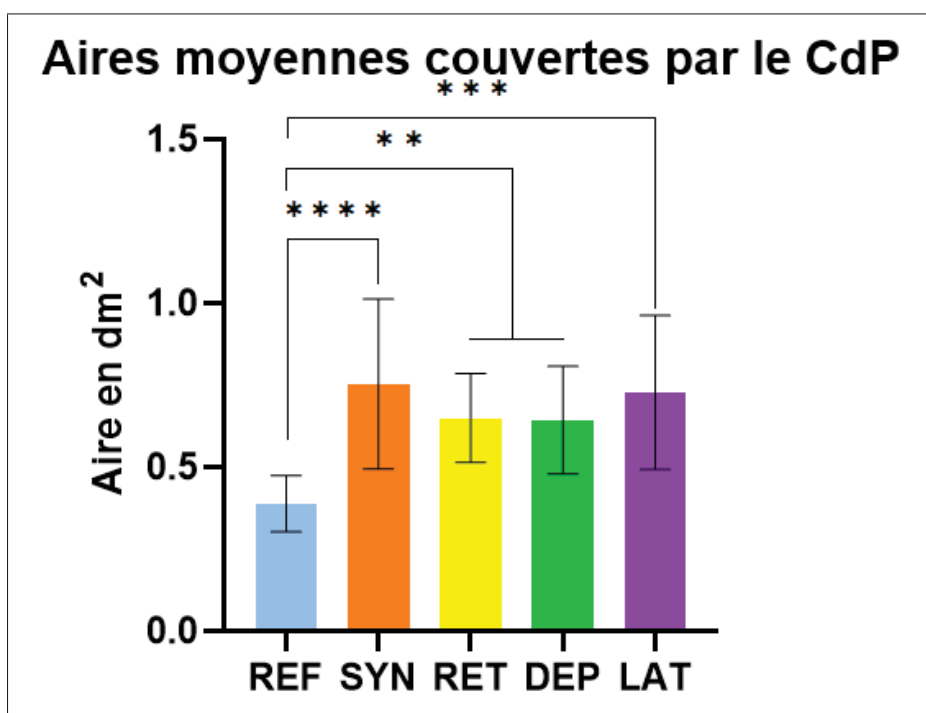


Figure 4.10 Aires moyennes couvertes par le CdP et écart type en fonction des conditions

4.3.3 Amplitude d'oscillation du CdP à 0,84 Hz

L'ensemble des conditions démontre des déplacements du CdP d'amplitude très différente, quel que soit l'axe étudié. REF demeure dans les deux cas l'amplitude la plus faible avec une moyenne de 0,2 mm en AP et ML. De plus, on observe des réponses pour les conditions avec vibration qui diffèrent selon l'axe étudié, les oscillations sont globalement plus élevées selon l'axe AP avec un minimum 2,6 mm contre un maximum de 2,2 mm en ML, voir la figure I-1.

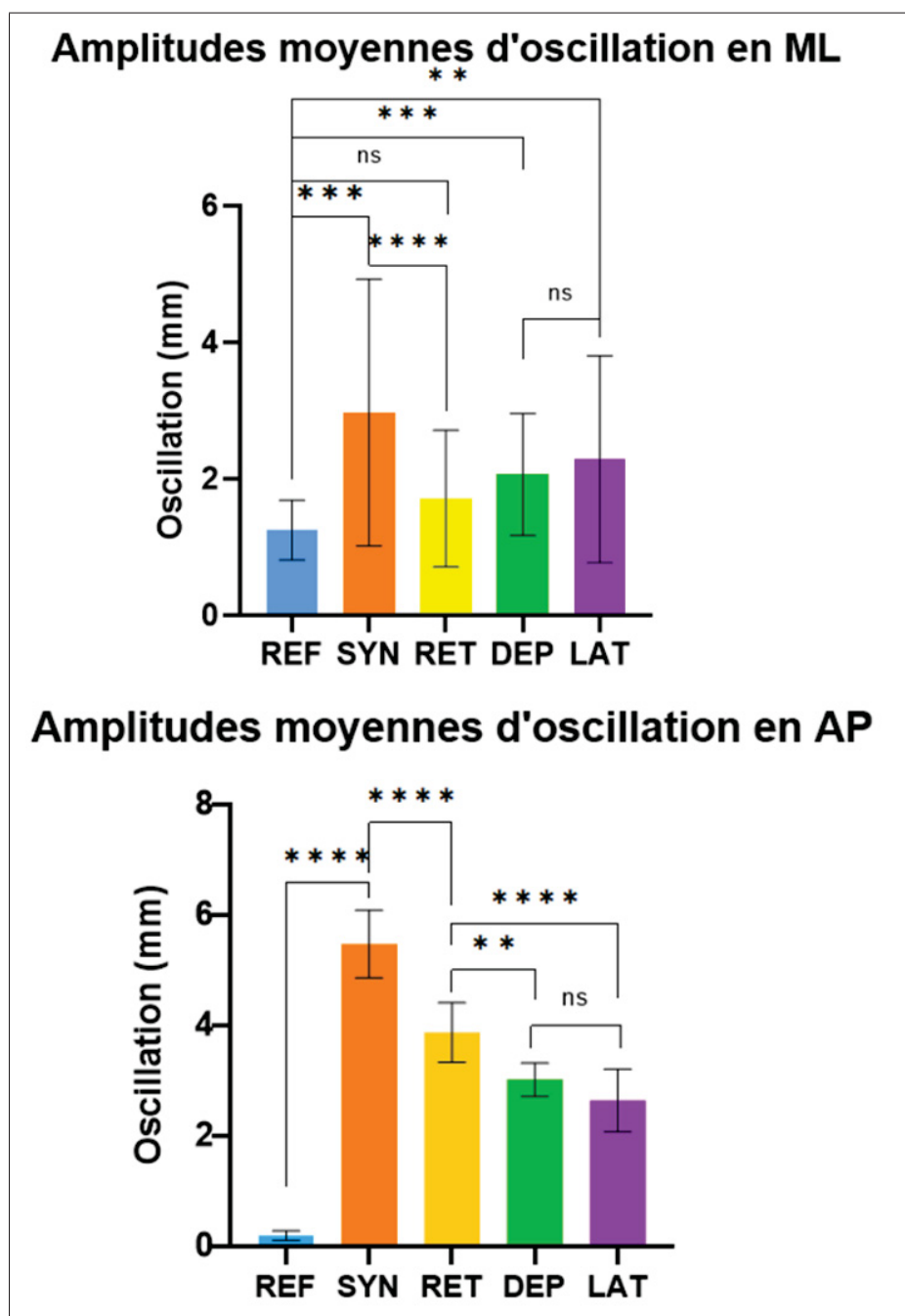


Figure 4.11 Amplitudes moyennes d'oscillation à 0,84 Hz pour chaque condition en AP et ML

CHAPITRE 5

DISCUSSION

L'objectif principal de cette étude (OS1) était de mesurer l'impact d'une stimulation visuoproprioceptive induisant la perception de marche au profit d'une stimulation visuelle seule afin de générer voire d'améliorer le sentiment d'incarnation et la perception de marche chez un participant immobile, en position debout et ne produisant pas de commande volontaire de marche. L'objectif secondaire (OS2) était de mesurer l'impact de différents niveaux de complexité des patrons de stimulation proprioceptive et de plusieurs degrés de synchronisation entre les stimulations appliquées. Les résultats démontrent que, malgré un niveau faible (maximum de 7,5/32), l'intentionnalité et la perception de marche sont meilleures dès qu'on utilise une stimulation visuoproprioceptive, quel que soit le patron de vibration appliqué, ce qui est cohérent avec plusieurs travaux antérieurs (Terziman et al., 2012; Leonardis et al., 2012; Kitazaki et al., 2019). Cela permet donc de valider la première hypothèse (H1) de recherche sur l'apport des vibrations. Par contre, ces résultats invalident la seconde hypothèse (H2) puisqu'aucune différence entre les conditions avec vibration n'a été perçue de façon statistiquement significative par les participants (SYN, RET, DEP, LAT). Ceci est contraire aux résultats de Kitazaki et al. sur l'effet d'une désynchronisation du signal, mais ne paraît pas aberrant compte tenu des faibles écarts mesurés entre les conditions dans les deux études. Toutefois, des différences significatives dans le comportement du CdP en réponse aux différents stimuli vibratoires tendent à prouver que la cohérence spatio-temporelle des stimulations visuoproprioceptives a un impact sur la réponse motrice du participant même si celui-ci ne perçoit pas les différences de comportement induites par les variations d'ajustement testées. Ce résultat n'a pas de comparatif dans les études prises pour référence ici et représente donc l'apport principal de cette étude.

5.1 2AFC

À l'image des études de Tajima et al., et Terziman et al., les tests 2AFC ont permis d'établir une classification des conditions expérimentales et souligner par la même occasion l'aspect favorable des stimulations multisensorielles. Le 2AFC permet, en fonction du niveau de perception de marche induit, d'aboutir au classement suivant : LAT, RET, SYN, DEP, REF. Ce résultat bien qu'inattendu est cohérent avec la littérature sur deux points : il est représentatif de la supériorité des stimulations multisensorielles par rapport à la stimulation d'un seul sens (Terziman et al., 2012; Leonardis et al., 2014) et il correspond à la prévalence de stimulation la plus simple avec le patron de vibration de LAT (64,2% de choix) par rapport aux patrons plus réalistes des conditions SYN, RET et DEP. Un résultat similaire est observable dans les expériences de Terziman et al. avec les différents patron de vibrations. De même, l'oscillation du champ visuel en vue à la première personne dans l'expérience de Kokkinara et al. semble contreproductive en cas d'incarnation trop faible (Terziman et al., 2012; Kokkinara et al., 2016).

5.2 Questionnaires

Les résultats de chacune des questions sont cohérents avec les résultats du 2AFC. Ils décrivent une incarnation et une perception de marche plus importante, quelle que soit la stimulation visuoproprioceptive sans permettre de distinguer les conditions avec vibration de façon significative. Les vibrations ont affecté de façon significative la perception de marche ainsi que le sentiment d'intentionnalité bien que cela n'apparaisse que sur la question 5 qui est l'une des trois questions se rapportant au sentiment d'intentionnalité. Les résultats des questions Q0 et Q9 sur la perception de marche sont cohérents avec les résultats de la littérature. Terziman et al. démontrent une prévalence pour les conditions simples et multisensorielles à l'image des résultats légèrement supérieurs de la condition LAT par rapport aux trois autres conditions avec vibration (Terziman et al., 2012). Kitazaki et al. ont démontré des différences significatives lorsqu'on applique un décalage temporel entre visuel et vibration. Or, nous n'observons aucune différence significative entre SYN, RET et DEP. Cette différence peut être expliquée

par les différences de délais appliqués, le choix de l'échelle d'évaluation sur 100 au lieu de 7 et le nombre d'évaluations des conditions (trois contre une) malgré un nombre d'itérations de la condition supérieur avant l'évaluation dans notre étude. De plus, nous pouvons supposer que les vibrations, au lieu d'être perçues comme un patron proprioceptif de marche, sont interprétées comme des afférences sensorielles proprioceptives non liées à la marche, de simples afférences tactiles ou encore auditive, dont la principale caractéristique est une rythmique s'appliquant avec divers délais sauf pour LAT. Les conditions SYN, RET et DEP ayant exactement le même patron, donc le même rythme avec un léger décalage temporel, seraient donc perçues de façon similaire et LAT apparaîtrait meilleure car elle possède un patron de vibration plus simple.

Nos résultats concordent avec nos cinq études de référence présentées à la section 1.5, lorsqu'on oppose le retour visuel à un retour visuel avec vibration : notre étude - 3 à 5/7 ; Leonardis - 3,5 à 5/7 ; Matsuda - 35 à 65/100 ; Kitazaki - 20 à 65 /100 ; Terziman 2,5 à 4,5/7. Seule l'étude de Kokkinara présente une note plus élevée de 6/7 pour le retour visuel en première personne sans oscillation contre 4/7 avec un retour visuel à la troisième personne sans oscillation. Cette différence peut s'expliquer par le rapport hiérarchique entre les deux conditions qui fait du retour visuel seul la meilleure condition dans cette étude alors qu'il s'agit de la condition la plus faible pour les autres études. Ces résultats démontrent aussi qu'il est cohérent d'observer une augmentation de 20 à 45% de la perception de marche de la pire condition vers la meilleure (notre étude atteste d'une hausse de 28,5%). La variabilité de ce pourcentage peut être attribuée aux conditions utilisées, aux graphismes, au réalisme des stimulations, à la posture du participant, la démarche de l'avatar, etc.

Les scores d'incarnation totaux sont faibles avec un maximum de 7,5 sur 32 ce qui est cohérent avec les résultats décrits par Leonardis et Kokkinara concernant l'impact de la passivité du participant sur l'incarnation (Leonardis et al., 2014 ; Kokkinara et al., 2016). Lors de l'expérience, le questionnaire utilisé tout comme la passivité du sujet ne reflètent pas le sentiment d'intentionnalité précédant la commande d'après Kokkinara. L'incapacité à déterminer l'intention de marche du participant au cours de l'expérience est donc une limite qui appellerait

l'usage d'autres outils de mesures tels que les signaux physiologiques (Leonardis et al., 2012 ; Kokkinara et al., 2016), les signaux EMG (Bourdin, Martini et Sanchez-Vives, 2019) ou encore les signaux EEG (ou BCI : Brain Computer Interface).

5.3 Analyse du CdP

L'analyse du comportement du CdP permet de démontrer l'impact de la cohérence entre les stimulations visuelles et proprioceptives. Les résultats présentés permettent de penser que tant que les afférences proprioceptives suggèrent un patron de marche, la synchronicité et le réalisme du patron de marche affectent de façon moindre le ressenti subjectif de marche, mais influencent significativement la réponse biomécanique du participant. Cela permet aussi de réduire l'importance de la question de l'intentionnalité soulevée par Kokkinara et al. en prouvant que la réponse aux vibrations n'est pas uniquement reliée à l'évaluation subjective et aux aléas de l'intentionnalité du participant (Kokkinara et al., 2016). La position debout des participants et l'utilisation de vibreurs induisant l'illusion de marche semblent modifier le comportement du CdP en fonction de l'axe d'oscillation observé et de la condition expérimentale appliquée. Les résultats de l'analyse des oscillations AP laissent supposer que plus l'illusion visuoproprioceptive induite est similaire à une afférence naturelle, plus la réponse biomécanique possède une forte amplitude : $SYN > RET > DEP > LAT > REF$.

En se basant sur les études de Slater et Lee, on peut supposer que plus le processus cognitif relié à la tâche à « accomplir » est proche du processus cognitif naturel, plus la réalisation de la tâche est performante et perçue comme telle. Par analogie, dans notre étude la différence perçue entre conditions est subtile et se fait sur deux critères d'après les résultats obtenus : vibration ou non, patron simple ou réaliste. L'argument de la performance reposerait sur la réponse biomécanique inconsciente du CdP qui tend à être plus ample pour les afférences les plus réalistes et synchrones, ce qui serait cohérent avec les résultats et notre seconde hypothèse (Slater, Usoh et Steed, 1995 ; Lee, Kim et Kim, 2017).

L'analyse des déplacements du CdP décrit non seulement les différences significatives entre la condition de référence et les autres conditions concernant l'aire couverte, mais aussi entre pratiquement toutes les conditions lorsqu'il s'agit de l'amplitude d'oscillation dans les axes AP et ML. De plus, en réponse à la stimulation proprioceptive et visuelle, le CdP tend à osciller de façon synchrone à la fréquence de marche stimulée de 0,84 Hz. L'amplitude d'oscillation apparaît aussi plus élevée pour l'axe AP qui est le principal plan d'action des groupes musculaires extenseurs et fléchisseurs ciblés par la stimulation proprioceptive. On retrouve dans les figures représentant les déplacements moyens du CdP les caractéristiques propres à chaque condition avec des signaux synchrones pour SYN et LAT, un léger délai de RET par rapport à SYN et LAT. On observe aussi une double réponse pour DEP qui semble correspondre à la stimulation visuelle d'une part car elle est en phase avec les autres conditions, mais de plus faible amplitude, et la réponse proprioceptive d'autre part qui apparaît plus faible encore, mais est en déphasage complet. Cela laisse supposer que DEP peut être interprétée comme deux stimulations distinctes juxtaposées et incohérentes sans pour autant créer une incarnation et une perception de marche inférieure à REF, ce qui devra donc à être étudié plus en profondeur à l'avenir.

Cela met en évidence l'apport des vibrations et l'impact de la synchronisation temporelle puisqu'il n'y a pas d'oscillation en condition REF alors que pour SYN, RET, DEP qui possèdent un patron identique mais avec un décalage dans le temps, ont des caractéristiques oscillatoires spatiotemporelles différentes. En tenant compte de la condition LAT qui est synchrone, mais avec un patron peu réaliste, on peut supposer l'importance première de la complexité du patron. En effet, cette condition offre des oscillations AP synchrones, avec toutefois des amplitudes inférieures aux trois autres conditions malgré l'absence de différence significative entre les DEP et LAT en AP comme en ML (Terziman et al., 2012 ; Caspar, Cleeremans et Haggard, 2015 ; Kokkinara et al., 2016).

5.4 Limites techniques

Les limites techniques des vibrateurs ont potentiellement participé à amoindrir le réalisme des patrons des vibrations et donc la perception démarche qu'ils devaient induire en raison d'une durée, d'une intensité et d'un nombre d'activations par cycle de marche inférieur à ceux escomptés notamment aux genoux et aux chevilles (extremums non inclus). De plus, une amélioration du patron de marche pourrait être envisagée en augmentant le nombre d'activations et en intégrant des groupes musculaires synergistes travaillant dans le plan médiolatéral.

Il aurait été pertinent d'avoir plus de conditions de contrôle comme une condition qui randomise les vibrations proprioceptives afin de pouvoir isoler l'effet de rythme lié aux stimulations tactiles en rythme avec le patron de marche observable, quelle que soit l'interprétation de cette stimulation (proprioceptives, tactile ou auditive) (Kitazaki et al., 2019). L'ajout d'éléments de contrôle du bruit émis par les vibrateurs ou la présence d'un environnement sonore pour les participants aurait potentiellement affecté positivement les résultats et interprétations énoncés (Terziman et al., 2012 ; Matsuda, 2020).

Enfin, l'usage d'un enregistrement de marche basé sur les caractéristiques d'un tiers et appliqué à un unique avatar ne correspondant ni à la morphologie des participants malgré des valeurs moyennes proches ni à leur cinématique de marche, constitue une limite de cette étude. Cela a potentiellement joué un rôle négatif sur le niveau d'incarnation des participants comme le montrent certaines remarques : « l'avatar a une démarche de garçon », « l'avatar est grand, est-ce qu'on peut changer sa taille ». On notera que Kitazaki et al. ont pu observer une problématique similaire malgré l'usage de deux enregistrements d'individus différents dont l'un des enregistrements de marche semblait donner de meilleurs résultats (Kitazaki et al., 2019). Il serait donc intéressant d'utiliser un patron de marche personnalisé pour produire le retour visuel de l'avatar ainsi que les patrons de vibrations.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Pour conclure, les principaux apports de cette étude sont les suivants. L'utilisation du retour visuel en réalité virtuelle couplé avec une stimulation vibratoire reflétant le patron proprioceptif de la marche permet d'accroître le sentiment d'incarnation et la perception de marche d'un individu sain, immobile en station debout et n'exerçant aucun mouvement volontaire. Le second apport important vient du fait que la complexité, le réalisme du patron de vibration et la cohérence spatiotemporelle entre les stimulations sensorielles semblent affecter de façon significative la réponse biomécanique du CdP et l'aspect temporel prévaux sur le réalisme. Le CdP présente, dans nos conditions expérimentales, des comportements spatiotemporels en accord avec les caractéristiques propres à chaque stimulation (fréquences, amplitudes, délais et patrons d'oscillation), et cela sans affecter significativement le ressenti subjectif de l'individu.

Cette expérience nous porte ainsi à nous interroger sur l'impact qu'auraient pu avoir certains ajouts expérimentaux qui devront faire l'objet de prochaines études. Parmi ces ajouts, l'étude d'une condition basée sur un patron de vibration sans retour visuel ou des vibrations aléatoires permettrait peut-être d'éclaircir le rôle tactile potentiellement joué par nos vibrations rythmées malgré le fait que l'étude de Kitazaki et al. nous pousse à croire que l'absence de vibration ou leur randomisation soit perçue de manière similaire (Kitazaki et al., 2019). L'ajout de mesure EMG permettrait de mieux évaluer l'effet des vibrations et potentiellement de diminuer l'impact de l'inconnue que représente l'intentionnalité de l'individu (Bourdin, Martini et Sanchez-Vives, 2019). Enfin, l'usage de BCI (Brain computer interface) permettrait d'accroître l'impression de marche ainsi que le sentiment d'incarnation dont la composante reposant sur l'intentionnalité deviendrait potentiellement mesurable.

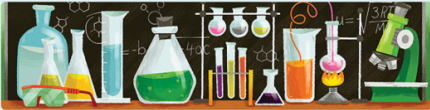
Concrètement, les résultats de cette étude permettent potentiellement la création d'outils en réadaptation à la marche accessible aux populations ayant un faible niveau de mobilité dans la mesure où elles peuvent percevoir normalement les afférences proprioceptives et visuelles. À

plus long terme, la manipulation des informations proprioceptives dans le cadre de la réalité virtuelle devrait permettre de mieux utiliser la plasticité cérébrale. De plus, cette méthode de création de l'incarnation et de l'illusion proprioceptive de marche permettrait la mise en place de nouveaux outils en matière de téléprésence dans les milieux professionnels, de l'enseignement ou encore du divertissement au travers de jeux vidéo plus immersifs.

ANNEXE I

COMPLÉMENTS

1. Questionnaires



Questionnaire d'incarnation

Consignes:

Voici plusieurs propositions qui peuvent s'appliquer ou non à l'expérience que vous venez de vivre.

Veuillez sélectionner l'énoncé qui décrit le mieux votre expérience.

Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse, seule votre opinion est importante.

**Obligatoire*

N° du Participant: *

Sélectionner

Condition testée *

Sélectionner

À quel point aviez-vous l'impression de marcher ? Zéro correspondant à "pas du tout" et dix "complètement". *

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

1. J'avais la sensation que le corps virtuel était mon propre corps: *

1 2 3 4 5 6 7

Pas du tout d'accord ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Tout à fait d'accord

2. Il m'a semblé que j'avais plus d'un corps: *

1 2 3 4 5 6 7

Pas du tout d'accord ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Tout à fait d'accord

3. J'avais la sensation que je pouvais contrôler le corps virtuel comme si c'était mon propre corps: *

1 2 3 4 5 6 7

Pas du tout d'accord ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Tout à fait d'accord

4. Les mouvements du corps virtuel étaient causés par mes mouvements: *

1 2 3 4 5 6 7

Pas du tout d'accord ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Tout à fait d'accord

5. J'avais la sensation que le corps virtuel bougeait de lui-même: *

1 2 3 4 5 6 7

Pas du tout d'accord ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Tout à fait d'accord

6. J'avais la sensation que mon corps était situé là où je voyais le corps virtuel: *

1 2 3 4 5 6 7

Pas du tout d'accord ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Tout à fait d'accord

7. J'avais la sensation d'être à l'extérieur de mon corps: *

1 2 3 4 5 6 7

Pas du tout d'accord ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Tout à fait d'accord

8. J'avais la sensation que mon corps (réel) se déplaçait vers le corps virtuel ou que le corps virtuel se déplaçait vers mon corps (réel): *

1 2 3 4 5 6 7

Pas du tout d'accord ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Tout à fait d'accord

9. J'avais la sensation de marcher: *

1 2 3 4 5 6 7

Pas du tout d'accord ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Tout à fait d'accord

Envoyer

Page 1 sur 1

Figure-A I-1 Questionnaire utilisé avec Google Form

2. Effet d'ordre des combinaisons

Les résultats suivants démontrent l'effet de l'ordre des conditions au sein de certaines combinaisons de conditions. Le tableau I-2 présente le nombre de répétitions sur 30 d'une paire dans l'ordre désigné à la colonne suivante et donne le pourcentage de points accumulés par la première condition uniquement dans cet ordre de passage puis en sens inverse dans la 4e colonne. La dernière colonne donne la différence induite par la modification de l'ordre de passage entre les deux pourcentages.

Répétitions	Combinaisons	Score 1ère conditions (gauche)	Score combinaison inverse	Différence
18	RET-DEP	61,1	91,7	30,6
12	SYN-RET	41,7	61,1	19,4
8	SYN-DEP	37,5	54,5	17,0
14	SYN-LAT	35,7	50,0	14,3
19	REF-RET	15,8	27,3	11,5
22	REF-LAT	13,6	25,0	11,4
16	DEP-LAT	43,8	35,7	8,0
19	REF-SYN	21,1	18,2	2,9
17	RET-LAT	41,2	38,5	2,7
16	REF-DEP	18,8	21,4	2,7

Figure-A I-2 Taux de choix durant le 2AFC en fonction des combinaisons et de l'ordre

Les combinaisons RET-DEP et SYN-RET sont grandement impactées par leur ordre de présentation avec des différences de score respectivement de 30,6% et 19,4% bien que les deux ordres possibles aient été présentés dans des proportions comparables.

BIBLIOGRAPHIE

- Adelstein, B. D., Lee, T. G. & Ellis, S. R. (2003). Head Tracking Latency in Virtual Environments : Psychophysics and a Model. 47(20), 2083–2087. doi : 10.1177/154193120304702001. Publisher : SAGE Publications Inc.
- Asai, T. (2014). Illusory body-ownership entails automatic compensative movement : for the unified representation between body and action. 233(3), 777–785. doi : 10.1007/s00221-014-4153-0.
- Botvinick, M. & Cohen, J. (1998). Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. 391(6669), 756–756. doi : 10.1038/35784. Number : 6669 Publisher : Nature Publishing Group.
- Bourdin, P., Martini, M. & Sanchez-Vives, M. V. (2019). Altered visual feedback from an embodied avatar unconsciously influences movement amplitude and muscle activity. 9(1), 19747. doi : 10.1038/s41598-019-56034-5. Number : 1 Publisher : Nature Publishing Group.
- Bouvier, P. (2009). La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur [phdthesis]. Université Paris-Est. Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00581550>.
- Braun, N., Debener, S., Sychala, N., Bongartz, E., Sörös, P., Müller, H. H. O. & Philipsen, A. (2018). The Senses of Agency and Ownership : A Review. 9. doi : 10.3389/fpsyg.2018.00535.
- Burin, D., Kilteni, K., Rabuffetti, M., Slater, M. & Pia, L. (2019). Body ownership increases the interference between observed and executed movements. 14(1), e0209899. doi : 10.1371/journal.pone.0209899.
- Calvin-Figuière, S., Romaiguère, P. & Roll, J.-P. (2000). Relations between the directions of vibration-induced kinesthetic illusions and the pattern of activation of antagonist muscles. 881(2), 128–138. doi : 10.1016/S0006-8993(00)02604-4.
- Caspar, E. A., Cleeremans, A. & Haggard, P. (2015). The relationship between human agency and embodiment. 33, 226–236. doi : 10.1016/j.concog.2015.01.007.
- Charbonneau, P., Shahnewaz, S., Arafat, I., Irfan, T., Samaraweera, G., Dallaire-Côté, M., Saint-Pierre Côté, S., Mezghani, N., Quarles, J. & Labbe, D. R. (2017). Gaitzilla : Exploration des effets de l’incarnation d’un monstre géant sur la cinématique des membres inférieur et la perception du temps. [Affiche]. Repéré à <http://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/17033/>.
- Chiu, M.-C., Wu, H.-C. & Chang, L.-Y. (2013). Gait speed and gender effects on center of pressure progression during normal walking. 37(1), 43–48. doi : 10.1016/j.gaitpost.2012.05.030.

- David, N., Newen, A. & Vogeley, K. (2008). The “sense of agency” and its underlying cognitive and neural mechanisms. 17(2), 523–534. doi : 10.1016/j.concog.2008.03.004.
- Duclos, C., Kemlin, C., Lazert, D., Gagnon, D., Dyer, J.-O. & Forget, R. (2014). Complex muscle vibration patterns to induce gait-like lower-limb movements : Proof of concept. 51(2), 245–252. doi : 10.1682/JRRD.2013.04.0079.
- Dummer, T., Picot-Annand, A., Neal, T. & Moore, C. (2009). Movement and the Rubber Hand Illusion. 38(2), 271–280. doi : 10.1068/p5921. Publisher : SAGE Publications Ltd STM.
- Ellis, S. R., Mania, K., Adelstein, B. D. & Hill, M. I. (2004). Generalizeability of Latency Detection in a Variety of Virtual Environments. 48(23), 2632–2636. doi : 10.1177/154193120404802306. Publisher : SAGE Publications Inc.
- Feasel, J., Whitton, M. C., Kassler, L., Brooks, F. P. & Lewek, M. D. (2011). The Integrated Virtual Environment Rehabilitation Treadmill System. 19(3), 290–297. doi : 10.1109/TNSRE.2011.2120623.
- Finley, J. M., Statton, M. A. & Bastian, A. J. (2014). A novel optic flow pattern speeds split-belt locomotor adaptation. 111(5), 969–976. doi : 10.1152/jn.00513.2013.
- Fox, J. & Bailenson, J. N. (2009). Virtual Self-Modeling : The Effects of Vicarious Reinforcement and Identification on Exercise Behaviors. 12(1), 1–25. doi : 10.1080/15213260802669474.
- Franck, N., Farrer, C., Georgieff, N., Marie-Cardine, M., Daléry, J., d’Amato, T. & Jeanne-rod, M. (2001). Defective Recognition of One’s Own Actions in Patients With Schizophrenia. 158(3), 454–459. doi : 10.1176/appi.ajp.158.3.454. Publisher : American Psychiatric Publishing.
- Fuchs, X., Riemer, M., Diers, M., Flor, H. & Trojan, J. (2016). Perceptual drifts of real and artificial limbs in the rubber hand illusion. 6, 24362. doi : 10.1038/srep24362.
- Gonzalez-Franco, M. & Peck, T. C. (2018). Avatar Embodiment. Towards a Standardized Questionnaire. 5, 1–9. doi : 10.3389/frobt.2018.00074.
- Goodwin, G. M. (1972). McCloskey DI, and Matthews PB. 95, 705–748.
- Hesse, S., Reiter, F., Jahnke, M., Dawson, M., Sarkodie-Gyan, T. & Mauritz, K.-H. (1997). Asymmetry of gait initiation in hemiparetic stroke subjects. 78(7), 719–724. doi : 10.1016/S0003-9993(97)90079-4.
- Hettinger, L. J., Berbaum, K. S., Kennedy, R. S., Dunlap, W. P. & Nolan, M. D. (1990). Vection and Simulator Sickness. 2(3), 171–181. doi : 10.1207/s15327876mp0203_4. Publisher : Routledge _eprint : https://doi.org/10.1207/s15327876mp0203_4.

- Janin, M. (2009). Sensibilité et motricité podales : leur influence sur le contrôle des activités posturo-cinétiques de sujets sains et pathologiques [phdthesis]. Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier. Repéré à <http://thesesups.ups-tlse.fr/706/>.
- Jeunet, C., Albert, L., Argelaguet, F. & Lecuyer, A. (2018). “Do You Feel in Control ?” : Towards Novel Approaches to Characterise, Manipulate and Measure the Sense of Agency in Virtual Environments. 24(4), 1486–1495. doi : 10.1109/TVCG.2018.2794598.
- Jian, Y., Winter, D., Ishac, M. & Gilchrist, L. (1993). Trajectory of the body COG and COP during initiation and termination of gait. 1(1), 9–22. doi : 10.1016/0966-6362(93)90038-3.
- Kiltani, K., Groten, R. & Slater, M. (2012). The Sense of Embodiment in Virtual Reality. 21(4), 373–387. doi : 10.1162/PRES_a_00124.
- Kitazaki, M., Hamada, T., Yoshiho, K., Kondo, R., Amemiya, T., Hirota, K. & Ikei, Y. (2019). Virtual Walking Sensation by Prerecorded Oscillating Optic Flow and Synchronous Foot Vibration. 10(5), 2041669519882448. doi : 10.1177/2041669519882448. Publisher : SAGE Publications.
- Kito, T., Hashimoto, T., Yoneda, T., Katamoto, S. & Naito, E. (2006). Sensory processing during kinesthetic aftereffect following illusory hand movement elicited by tendon vibration. 1114(1), 75–84. doi : 10.1016/j.brainres.2006.07.062.
- Kokkinara, E., Slater, M. & López-Moliner, J. (2015). The Effects of Visuomotor Calibration to the Perceived Space and Body, through Embodiment in Immersive Virtual Reality. 13(1), 1–22. doi : 10.1145/2818998.
- Kokkinara, E., Kiltani, 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. 6(1). doi : 10.1038/srep28879.
- Lamont, K., Chin, M. & Kogan, M. (2011). Mirror Box Therapy – Seeing is Believing. 7(6), 369–372. doi : 10.1016/j.explore.2011.08.002.
- Lamontagne, A., Fung, J., McFadyen, B. J. & Faubert, J. (2007). Modulation of walking speed by changing optic flow in persons with stroke. 4(1). doi : 10.1186/1743-0003-4-22.
- Lateiner, J. E. & Sainburg, R. L. (2003). Differential contributions of vision and proprioception to movement accuracy. 151(4), 446–454. doi : 10.1007/s00221-003-1503-8.
- Lee, J., Kim, M. & Kim, J. (2017). A Study on Immersion and VR Sickness in Walking Interaction for Immersive Virtual Reality Applications. 9(5), 78. doi : 10.3390/sym9050078. Number : 5 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Leonardis, D., Frisoli, A., Solazzi, M. & Bergamasco, M. (2012). Illusory perception of arm movement induced by visuo-proprioceptive sensory stimulation and controlled by motor

- imagery. *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 421–424. doi : 10.1109/HAPTIC.2012.6183825.
- Leonardis, D., Frisoli, A., Barsotti, M., Carrozzino, M. & Bergamasco, M. (2014). Multisensory Feedback Can Enhance Embodiment Within an Enriched Virtual Walking Scenario. *23(3)*, 253–266. doi : 10.1162/PRES_a_00190.
- Lippi, V., Avizzano, C. A., Mottet, D. & Ruffaldi, E. (2010). Effect of delay on dynamic targets tracking performance and behavior in virtual environment. *19th International Symposium in Robot and Human Interactive Communication*, pp. 446–451. doi : 10.1109/RO-MAN.2010.5598607.
- Lopez, C., Halje, P. & Blanke, O. (2008). Body ownership and embodiment : Vestibular and multisensory mechanisms. *38(3)*, 149–161. doi : 10.1016/j.neucli.2007.12.006.
- Matsuda, Y. (2020). Perception of Walking Self-Body Avatar Enhances Virtual-Walking Sensation. *2*.
- 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 ? *66A(2)*, 234–240. doi : 10.1093/gerona/glq201. Publisher : Oxford Academic.
- Mullie, Y. & Duclos, C. (2014). Role of proprioceptive information to control balance during gait in healthy and hemiparetic individuals. *40(4)*, 610–615. doi : 10.1016/j.gaitpost.2014.07.008.
- Naito, E., Ehrsson, H. H., Geyer, S., Zilles, K. & Roland, P. E. (1999). Illusory Arm Movements Activate Cortical Motor Areas : A Positron Emission Tomography Study. *19(14)*, 6134–6144. doi : 10.1523/JNEUROSCI.19-14-06134.1999. Publisher : Society for Neuroscience Section : ARTICLE.
- Norman, G. (2010). Likert scales, levels of measurement and the "laws" of statistics. *15(5)*, 625–632. doi : 10.1007/s10459-010-9222-y.
- Normand, J.-M., Giannopoulos, E., Spanlang, B. & Slater, M. (2011). Multisensory Stimulation Can Induce an Illusion of Larger Belly Size in Immersive Virtual Reality. *6(1)*. doi : 10.1371/journal.pone.0016128.
- Pataky, T. C., Robinson, M. A., Vanrenterghem, J., Savage, R., Bates, K. T. & Crompton, R. H. (2014). Vector field statistics for objective center-of-pressure trajectory analysis during gait, with evidence of scalar sensitivity to small coordinate system rotations. *40(1)*, 255–258. doi : 10.1016/j.gaitpost.2014.01.023.
- Peck, T. C., Seinfeld, S., Aglioti, S. M. & Slater, M. (2013). Putting yourself in the skin of a black avatar reduces implicit racial bias. *22(3)*, 779–787. doi : 10.1016/j.concog.2013.04.016.

- Petkova, V. I., Khoshnevis, M. & Ehrsson, H. H. (2011). The Perspective Matters ! Multisensory Integration in Ego-Centric Reference Frames Determines Full-Body Ownership. 2. doi : 10.3389/fpsyg.2011.00035.
- Roll, J.-P., Albert, F., Thyron, C., Ribot-Ciscar, E., Bergenheim, M. & Mattei, B. (2009). Inducing Any Virtual Two-Dimensional Movement in Humans by Applying Muscle Tendon Vibration. 101(2), 816–823. doi : 10.1152/jn.91075.2008. Publisher : American Physiological Society.
- Samaraweera, G., Perdomo, A. & Quarles, J. (2015). Applying latency to half of a self-avatar's body to change real walking patterns. *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 89–96. doi : 10.1109/VR.2015.7223329.
- Santos, M. J., Kanekar, N. & Aruin, A. S. (2010). The role of anticipatory postural adjustments in compensatory control of posture : 2. Biomechanical analysis. 20(3), 398–405. doi : 10.1016/j.jelekin.2010.01.002.
- Schumann, T., Redfern, M. S., Furman, J. M., El-Jaroudi, A. & Chaparro, L. F. (1995). Time-frequency analysis of postural sway. 28(5), 603–607. doi : 10.1016/0021-9290(94)00113-I.
- Seinfeld, S., Arroyo-Palacios, J., Iruretagoyena, G., Hortensius, R., Zapata, L. E., Borland, D., de Gelder, B., Slater, M. & Sanchez-Vives, M. V. (2018). Offenders become the victim in virtual reality : impact of changing perspective in domestic violence. 8(1), 1–11. doi : 10.1038/s41598-018-19987-7. Number : 1 Publisher : Nature Publishing Group.
- Sienko, K. H., Balkwill, M. D., Oddsson, L. I. E. & Wall, C. (2013). The effect of vibrotactile feedback on postural sway during locomotor activities. 10(1), 93. doi : 10.1186/1743-0003-10-93.
- Slater, M., Usoh, M. & Chrysanthou, Y. (1995a). The Influence of Dynamic Shadows on Presence in Immersive Virtual Environments. *Virtual Environments '95*, (Eurographics), 8–21. doi : 10.1007/978-3-7091-9433-1_2.
- Slater, M., Usoh, M. & Steed, A. (1995b). Taking steps : the influence of a walking technique on presence in virtual reality. Association for Computing Machinery. Repéré à <https://doi.org/10.1145/210079.210084>.
- Slater, M., Linakis, V., Usoh, M. & Kooper, R. (1996). Immersion, presence and performance in virtual environments : an experiment with tri-dimensional chess. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, (VRST '96), 163–172. doi : 10.1145/3304181.3304216.
- Slater, M., Spanlang, B., Sanchez-Vives, M. V. & Blanke, O. (2010). First Person Experience of Body Transfer in Virtual Reality. 5(5), e10564. doi : 10.1371/journal.pone.0010564.
- Sullivan, G. M. & Artino, A. R. (2013). Analyzing and Interpreting Data From Likert-Type Scales. 5(4), 541–542. doi : 10.4300/JGME-5-4-18.

- Sveistrup, H. (2004). Motor rehabilitation using virtual reality. 1(1), 10. doi : 10.1186/1743-0003-1-10.
- Tajima, D., Mizuno, T., Kume, Y. & Yoshida, T. (2015). The mirror illusion : does proprioceptive drift go hand in hand with sense of agency ? 6. doi : 10.3389/fpsyg.2015.00200.
- Tapin, A., Duclos, N. & Duclos, C. (2019). Perception of gait movements using gait-like vibrations in 565 individuals with and without sensorimotor deficits.
- Terziman, L., Marchal, M., Multon, F., Arnaldi, B. & Lecuyer, A. (2012). The King-Kong Effects : Improving sensation of walking in VR with visual and tactile vibrations at each step. *2012 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 19–26. doi : 10.1109/3DUI.2012.6184179.
- Tosi, G., Romano, D. & Maravita, A. (2018). Mirror Box Training in Hemiplegic Stroke Patients Affects Body Representation. 11. doi : 10.3389/fnhum.2017.00617.
- Tsakiris, M., Longo, M. R. & Haggard, P. (2010). Having a body versus moving your body : Neural signatures of agency and body-ownership. 48(9), 2740–2749. doi : 10.1016/j.neuropsychologia.2010.05.021.
- Tudor-Locke, C., Hatano, Y., Pangrazi, R. P. & Kang, M. (2008). Revisiting "How Many Steps Are Enough ?" :. 40, S537–S543. doi : 10.1249/MSS.0b013e31817c7133.
- Tudor-Locke, C., Craig, C. L., Beets, M. W., Belton, S., Cardon, G. M., Duncan, S., Hatano, Y., Lubans, D. R., Olds, T. S., Raustorp, A., Rowe, D. A., Spence, J. C., Tanaka, S. & Blair, S. N. (2011). How many steps/day are enough ? for children and adolescents. 8(1), 78. doi : 10.1186/1479-5868-8-78.
- Willems, P.-A., Schepens, B. & Detrembleur, C. (2012). Marche normale. 8(1), 1–30. doi : 10.1016/S1283-0887(12)70034-8.
- Winter, D. A. (1987). *The biomechanics and motor control of human gait*. Univ. of Waterloo Press , p.72.