

**Institut Limousin de FOrmation
aux MÉtiers de la Réadaptation
Masso-kinésithérapie**

**Etude de tolérance : association de la réalité virtuelle immersive et
de l'assistance robotisée à la marche avec des sujets sains**

Mémoire présenté et soutenu par
Rafael Vrillaud

En juin 2022



**Mémoire dirigé par
Charles Morizio**
Masseur-kinésithérapeute

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu ma famille et ma mère chez qui j'ai toujours pu trouver un cadre sain de vie et de travail.

Je remercie vivement Charles MORIZIO, mon directeur de mémoire, expert de terrain, tuteur de stage et ami, qui a accepté que je l'accompagne ces deux dernières années dans sa thèse et son projet RAVIS. Je le remercie pour toutes ces heures de relecture, ces nuits blanches à refaire l'environnement pour que je puisse l'utiliser, et cette disponibilité toujours avec le sourire.

Je remercie Anaick PERROCHON, pour son apport méthodologique, son suivi et sa qualité de cours ces dernières années.

Je remercie le personnel du service MPR qui m'a permis plus ou moins de bon cœur de me céder leur bureau pour les 3 semaines de passations, et de s'être prêté au jeu de l'expérimentation.

Je remercie les masters, doctorants et enseignants chercheurs d'HVAE pour leur accompagnement pendant mon clinicat, avec un petit plus pour cette belle personne qu'est Michel BERNARD.

Je remercie les étudiants de l'ILFOMER, les masters et doctorants d'HVAE et le personnel de MPR qui se sont portés volontaires pour participer à l'expérimentation.

Je remercie mes colocataires, Mathilde LARNAUDIE et Paul SEEGERS pour m'avoir ouvert la voie ces 3 dernières années et pour les prochaines je l'espère.

Je remercie ma promotion pour ces quatre années de folie, avec un petit plus pour les membres de la BITE, et pour Léo FOUCAMBERT et toutes ces heures passées à CBU.

Le meilleur pour la fin, je remercie Ananda LENGART pour le calme et la sagesse qu'elle a toujours su m'apporter.

Droits d'auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :

« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »

disponible en ligne : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>



Charte anti-plagiat

La Direction Régionale de la Jeunesse, des Sports et de la Cohésion Sociale délivre sous l'autorité du Préfet de région les diplômes du travail social et des auxiliaires médicaux et sous l'autorité du Ministre chargé des sports les diplômes du champ du sport et de l'animation.

Elle est également garante de la qualité des enseignements délivrés dans les dispositifs de formation préparant à l'obtention de ces diplômes.

C'est dans le but de garantir la valeur des diplômes qu'elle délivre et la qualité des dispositifs de formation qu'elle évalue que les directives suivantes sont formulées à l'endroit des étudiants et stagiaires en formation.

Article 1 :

Tout étudiant et stagiaire s'engage à faire figurer et à signer sur chacun de ses travaux, deuxième de couverture, l'engagement suivant :

Je, soussigné Rafael Vrillaud

**atteste avoir pris connaissance de la charte anti plagiat élaborée par la DRDJSCS NA
– site de Limoges et de m'y être conformé.**

Et certifie que le mémoire/dossier présenté étant le fruit de mon travail personnel, il ne pourra être cité sans respect des principes de cette charte.

Fait à Limoges, Le mercredi 1er septembre 2021

Suivi de la signature.

Article 2 :

« Le plagiat consiste à insérer dans tout travail, écrit ou oral, des formulations, phrases, passages, images, en les faisant passer pour siens. Le plagiat est réalisé de la part de l'auteur du travail (devenu le plagiaire) par l'omission de la référence correcte aux textes ou aux idées d'autrui et à leur source ».

Article 3 :

Tout étudiant, tout stagiaire s'engage à encadrer par des guillemets tout texte ou partie de texte emprunté(e) ; et à faire figurer explicitement dans l'ensemble de ses travaux les références des sources de cet emprunt. Ce référencement doit permettre au lecteur et correcteur de vérifier l'exactitude des informations rapportées par consultation des sources utilisées.

Article 4 :

Le plagiaire s'expose aux procédures disciplinaires prévues au règlement intérieur de l'établissement de formation. Celles-ci prévoient au moins sa non présentation ou son retrait de présentation aux épreuves certificatives du diplôme préparé.

En application du Code de l'éducation et du Code pénal, il s'expose également aux poursuites et peines pénales que la DRJSCS est en droit d'engager. Cette exposition vaut également pour tout complice du délit.

Vérification de l'anonymat

Mémoire DE Masseur-Kinésithérapeute

Session de juin 2022

Attestation de vérification d'anonymat

Je soussignée(e) Rafael Vrillaud

Etudiant.e de 4ème année

Atteste avoir vérifié que les informations contenues dans mon mémoire respectent strictement l'anonymat des personnes et que les noms qui y apparaissent sont des pseudonymes (corps de texte et annexes).

Si besoin l'anonymat des lieux a été effectué en concertation avec mon Directeur de mémoire.

Fait à :Limoges

Le : mercredi 1er septembre 2021

Signature de l'étudiant.e



Glossaire

AVC : Accident Vasculaire Cérébral

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

EI : Effets Indésirables

ENSIL : Ecole National Supérieure d'Ingénieurs de Limoges

EV : Environnement Virtuel

FAC : Functional Ambulation Classification

GT : Gait Trainer

HAS : Haute Autorité de Santé

HAVAE : Handicap Activité Vieillesse Autonomie Environnement

HLH : Hémianopsie Latérale Homonyme

ILFOMER : Institut Limousin de FOrmation aux MEtiers de la Réadaptation

INSERM : Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale

MSSQ-Short : Motion Sickness Susceptibility Questionnaire Short

MPR : Médecine Physique et Réadaptation

m : mètre

m/s : mètre par seconde

MI : Membre Inférieur

min : minute

MS : Membre Supérieur

NSU : Négligence Spatiale Unilatérale

PQ : Presence Questionnaire

RV : Réalité Virtuelle

SdP : Sentiment de Présence

SSQ : Simulator Sickness Questionnaire

SUS : System Usability Scale

Table des matières

Cadre théorique.....	12
1. Accident Vasculaire Cérébral.....	12
1.1. Définition.....	12
1.2. Epidémiologie.....	12
1.3. Physiopathologie.....	12
1.3.1. Facteurs de risques cardio-vasculaires.....	14
1.3.2. Symptômes.....	14
1.3.3. Anatomie et conséquences.....	14
1.4. Les principes de rééducation.....	16
2. Marche.....	17
2.1. Cycle de la marche.....	17
2.2. Paramètres de la marche.....	19
2.3. Contrôle neurologique.....	20
2.4. Marche du patient post-accident vasculaire cérébral.....	22
2.5. La rééducation de la marche d'un patient post-accident vasculaire cérébral.....	23
2.5.1. Présentation des méthodes « conventionnelles ».....	23
2.5.2. La place des systèmes robotisés dans la rééducation de la marche.....	24
3. Réalité virtuelle.....	26
3.1. Définition, avantages et limites.....	26
3.2. La réalité virtuelle dans la rééducation post-accident vasculaire cérébral.....	27
3.3. La réalité virtuelle et l'assistance robotisée.....	28
3.4. La réalité virtuelle et la tolérance en rééducation.....	28
Problématique.....	31
Matériel et méthode.....	32
1. Design de l'étude.....	32
1.1. Description de la population.....	32
1.2. Critères d'éligibilité.....	32
1.2.1. Critères d'inclusion.....	32
1.2.2. Critères de non-inclusion.....	32
2. Déroulement du protocole.....	32
2.1. Type d'étude.....	32
2.2. Inclusion.....	33
2.2.1. Participants.....	33
2.3. Déroulement des séances.....	33
2.4. Variables étudiées.....	35
2.4.1. Critère de jugement principal.....	35
2.4.2. Critères de jugement secondaires.....	36
2.4.2.1. Sentiment de présence.....	36
2.4.2.2. Utilisabilité du système.....	37
2.5. Données recueillies auprès des patients.....	37
3. Matériel utilisé.....	38
3.1. Assistance robotisée à la marche.....	38
3.2. Casque de réalité virtuelle.....	39
3.3. Programme informatique et environnement virtuel.....	39
4. Analyse statistique.....	41

4.1. Analyses descriptives	41
4.2. Analyse principale	41
4.3. Analyses secondaires.....	41
Résultats	42
1. Population.....	42
1.1. Diagramme de flux	42
1.2. Caractéristiques générales des participants	43
1.3. Contenu des séances.....	43
2. Incidence et sévérité des effets indésirables	44
3. Objectifs secondaires.....	45
3.1. Lien entre le Motion Sickness Susceptibility Questionnaire Short et l'apparition d'évènements indésirables	45
3.2. Evolution de la tolérance au cours des séances	45
3.3. Sentiment de présence.....	46
3.3.1. Lien entre le sentiment de présence et l'apparition d'évènements indésirables	46
3.4. Utilisabilité du système	48
Discussion.....	49
1. Objectif de l'étude	49
2. Interprétation des résultats et comparaison avec la littérature.....	49
2.1. Incidence et sévérité des effets indésirables	49
2.2. Lien entre le Motion Sickness Susceptibility Questionnaire-Short et l'apparition d'évènements indésirables	51
2.3. Recherche d'une habitude	51
2.4. Sentiment de présence.....	52
2.5. Lien entre le sentiment de présence et les évènements indésirables	52
2.6. Utilisabilité du système	53
3. Généralisation.....	54
4. Limites et perspectives.....	54
4.1. Gait Trainer et assistance robotisée à la marche.....	55
4.2. Réalité virtuelle.....	55
4.3. Suite du projet	55
Conclusion	57
Références bibliographiques	58
Annexes	64

Table des illustrations

Figure 1 : Schéma de la zone cérébrale atteinte lors d'un AVC ischémique (6)	13
Figure 2 : Polygone de Willis permettant l'irrigation du cerveau	15
Figure 3 : Cycle de la marche selon Viel (14)	19
Figure 4 : Modèle général de l'organisation du contrôle postural, de la marche et du mouvement volontaire, traduit en français (21)	21
Figure 5 : Classification de la marche de l'hémiplégique spastique selon Winters (23)	22
Figure 6 : Exemple d'appareils robotisés de rééducation à la marche avec a) Gait Trainer GT II Rehaslim ® et b) Lokomat ®	25
Figure 7 : Différents environnements virtuels.....	26
Figure 8 : Déroulement chronologique de l'étude	33
Figure 9 : Illustration du dispositif	34
Figure 10 : Dispositif de rééducation à la marche robot-assistée Gait Trainer GT1	38
Figure 11 : Casque de réalité virtuelle HTC Vive ®.....	39
Figure 12 : Environnement virtuel utilisé au sein du dispositif de rééducation.....	40
Figure 13 : Diagramme de flux adapté de la méthode CONSORT.....	42
Figure 14 : Description du score pré et post séance du Simulator Sickness Questionnaire .	44
Figure 15 : Evolution du Δ SSQ au cours des séances.....	45
Figure 16 : Evolution du score du Presence Questionnaire entre les séances.....	46
Figure 17 : Corrélation entre les scores du Simulator Sickness Questionnaire et du Presence Questionnaire	47
Figure 18 : Utilisabilité du dispositif par le System Usability System	48
Figure 19 : Facteurs influençant le sentiment de présence et l'apparition d'effets indésirables	53
Figure 20 : Signification du score SUS (81)	54

Table des tableaux

Tableau 1 : Tableau clinique en fonction de la zone touchée (10)	16
Tableau 2 : Simulator Sickness Questionnaire et sa notation	36
Tableau 3 : Recueil des données	37
Tableau 4 : Caractéristiques générales des participants.....	43
Tableau 5 : Comparaison du score du SSQ selon les études	50
Tableau 6 : Critères d'inclusion et de non-inclusion du projet RAVIS.....	56

Cadre théorique

1. Accident Vasculaire Cérébral

1.1. Définition

L'Accident Vasculaire Cérébral (AVC) est, selon la Haute Autorité de Santé (HAS), « l'arrêt brutal de la circulation sanguine au niveau d'une partie du cerveau »(1). Il en résulte donc un déficit brutal d'une fonction cérébrale dû à l'interruption du flux sanguin, privant une ou plusieurs parties du cerveau d'oxygène et de glucose. Le manque de ces deux derniers va provoquer le dysfonctionnement des cellules puis leur mort en quelques minutes (min) au niveau de la zone touchée. La gravité de l'AVC va dépendre de la localisation et de l'étendue des aires cérébrales atteintes.

1.2. Epidémiologie

En France, l'AVC est la première cause de handicap acquis chez l'adulte et la troisième cause de décès (2). Selon l'Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM), on dénombre en France plus de 140 000 nouveaux cas d'AVC par an soit un AVC toutes les 4 min (3). De plus, le nombre d'hospitalisations dues aux AVC était de 110 000 en 2014 (4). Chez l'homme, c'est la troisième cause de décès et chez la femme, la première, représentant à eux deux 40 000 morts par an.

Si l'AVC a un âge moyen de survenue de 74 ans, 25% des patients ont cependant moins de 65 ans et 10% moins de 45 ans. Selon la HAS, l'AVC est un facteur de risque majeur de dépendance, puisque 60% des patients post-AVC présentent un handicap séquellaire qui gêne la réalisation des activités de la vie quotidienne. La prise en charge se doit donc d'être efficace, car l'AVC est un réel enjeu de santé publique.

1.3. Physiopathologie

Il existe donc deux principales catégories d'AVC :

- Les AVC ischémiques sont les plus fréquents (80%). Les principales causes sont l'embolie d'origine cardiaque et l'athérosclérose (accumulation de plaques de cholestérol sur les parois artérielles qui en se détachant et en remontant dans les vaisseaux grâce au flux sanguin vont former un caillot). Il existe d'autres causes qui restent minoritaires comme la microangiopathie ou la dissection carotidienne (5).
- Les AVC hémorragiques représentent 20% des cas. Ils sont dus à l'hypertension artérielle, aux ruptures d'anévrismes (malformations vasculaires) ou encore aux accidents hémorragiques post-traumatique (5).

Le diagnostic n'est posé qu'à la suite de l'IRM. L'IRM permet de voir la zone nécrosée (mort cellulaire définitive, en blanc sur la Figure 1) et la zone de pénombre (liée au manque d'oxygène causant l'apparition de symptômes mais pas suffisant pour provoquer une nécrose définitive, en gris clair sur la Figure 1) (5).

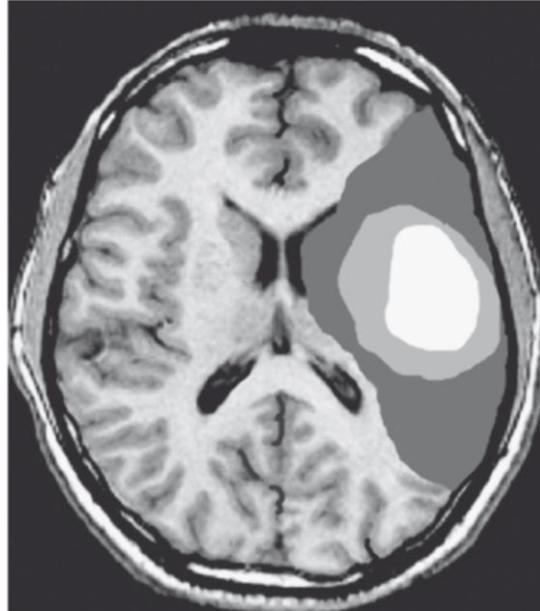


Figure 1 : Schéma de la zone cérébrale atteinte lors d'un AVC ischémique (6)

Le terme d'AVC regroupe donc les accidents ischémiques cérébraux artériels constitués (par infarctus) et transitoire, les accidents hémorragiques cérébraux et les thrombophlébites cérébrales veineuses (3).

On distingue trois phases dans cette pathologie (1) :

- La phase aiguë qui débute au moment de l'AVC et qui prend fin le quatorzième jour post-AVC
- La phase subaiguë qui débute le quatorzième jour post-AVC et qui prend fin six mois après l'AVC
- La phase chronique qui débute six mois après l'AVC

1.3.1. Facteurs de risques cardio-vasculaires

Il existe deux types de facteurs de risque d'AVC. Tout d'abord, il y a les facteurs non-modifiables comme l'âge, le sexe, les antécédents familiaux ou encore la race et l'origine ethnique. En opposition à cette catégorie, il y a donc les facteurs modifiables (7) : la consommation de tabac et d'alcool, l'hypertension artérielle, l'activité physique, le diabète, l'obésité, l'excès de cholestérol, le régime alimentaire (par ex une alimentation riche en sel augmente l'hypertension artérielle).

Cette seconde catégorie nous intéresse particulièrement, car ce sont sur ceux-là que nous pouvons agir avant l'accident en prévention primaire, ou bien en prévention secondaire afin d'éviter un nouvel AVC. En effet, le risque de récurrence après un premier AVC est de 20 à 30% dans les 5 ans qui suivent (8).

1.3.2. Symptômes

Depuis une dizaine d'années, une campagne de prévention sur la reconnaissance des symptômes est menée en France pour réduire le délai entre le début de l'AVC et la prise en charge du patient, pour rapidement amener le patient en unité neuro-vasculaire si besoin.

Les symptômes sont les suivants (3) :

- Faiblesse musculaire, et paralysie d'un ou plusieurs membres ou du visage
- Perte de sensibilité ou un engourdissement d'un ou plusieurs membres ou du visage
- Cécité unilatérale, hémianopsie, diplopie
- Difficultés à parler, dysarthrie ou aphasie
- Troubles de l'équilibre ou de la coordination des membres
- Troubles de la vigilance allant jusqu'au coma
- Mal de tête, brutal intense et inhabituel

Dès lors qu'il y a l'apparition d'un ou plusieurs symptômes, le patient et ses proches doivent composer le 15 afin d'avoir une prise en charge la plus rapide possible. Le patient entre alors dans une filière préhospitalière et intra hospitalière post-AVC.

1.3.3. Anatomie et conséquences

Le sang est amené au cerveau par 4 artères, les artères vertébrales droite et gauche, et les artères carotides internes, droite et gauche (Figure 2).

Les artères carotides internes se séparent en artères cérébrales antérieures droite et gauche, qui irriguent l'avant de chaque hémisphère cérébral, et en artères cérébrales moyennes droite et gauche, appelées artères sylviennes, qui irriguent les parties latérales de chaque

hémisphère. Les artères vertébrales droite et gauche se réunissent en une unique artère basilaire qui apporte le sang au cervelet et au tronc cérébral puis qui se divise en artères cérébrales postérieures droite et gauche qui irriguent la partie postérieure de chaque hémisphère cérébral. Les artères communicantes antérieures et postérieures permettent la réunion des circulations artérielles droite et gauche. L'ensemble forme le polygone de Willis. Ce système artériel permet le maintien de la circulation artérielle en cas d'occlusion d'une artère carotide (9).

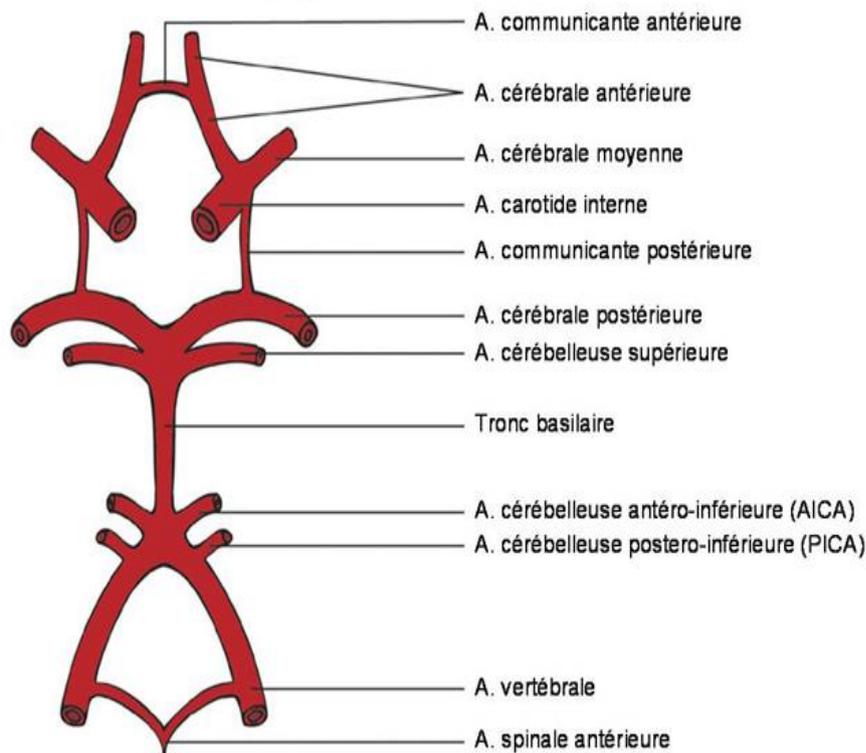


Figure 2 : Polygone de Willis permettant l'irrigation du cerveau

Les conséquences d'un AVC sont multiples et propres à chaque individu. Cependant, selon le site de l'accident, nous allons pouvoir retrouver généralement les mêmes tableaux cliniques chez chaque patient. Comme décrit dans le

Tableau 1, en fonction du territoire touché, l'hémiplégie peut être gauche ou droite ; brachiofaciale, prédominante sur le MI ou proportionnelle ; motrice pure ou mixte (atteinte sensitive et motrice).

L'hémiplégie est « la perte plus ou moins complète de la motricité volontaire dans une moitié du corps » (10). Lorsque le déficit n'est que partiel, on va parler alors d'hémi-parésie.

L'hémiplégie est provoquée par une lésion plus ou moins complète du faisceau pyramidal en un point quelconque de son trajet, souvent encéphalique dans le cas de l'AVC. Elle se

caractérise donc par un trouble de la commande motrice, accompagné de troubles du tonus et par la présence de syncinésies (mouvements anormaux) (10).

Tableau 1 : Tableau clinique en fonction de la zone touchée (10)

	Artère cérébrale moyenne		Artère cérébrale antérieure	Artère cérébrale postérieure
	Droite	Gauche		
Territoire supérieur	<ul style="list-style-type: none"> - Hémiplégie brachiofaciale gauche sensorimotrice - Hémianopsie latérale homonyme (HLH) - Négligence spatiale unilatérale (NSU) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hémiplégie brachiofaciale droite sensorimotrice - HLH - Aphasie 	<ul style="list-style-type: none"> - Hémiplégie prédominant au membre inférieur (MI) sensitivomotrice - Syndrome frontal 	<ul style="list-style-type: none"> - HLH controlatérale à la lésion - Agnosie visuelle
Territoire inférieur	<ul style="list-style-type: none"> - Hémiplégie proportionnelle massive, sans atteinte sensitive (motrice pure) - Intéresse tout l'hémicorps 			<ul style="list-style-type: none"> - Troubles de la sensibilité de l'hémicorps opposé - Douleur spontanée, dysesthésie

1.4. Les principes de rééducation

Au cours des deux premières semaines suivant l'AVC, la thérapie visant la récupération de la motricité doit consister en des interventions fréquentes et courtes chaque jour, commençant généralement entre 24 et 48 heures après le début de l'AVC. (11)

Les recommandations sont des séances d'une durée d'environ 45 min, à une fréquence qui leur permet d'atteindre leurs objectifs de rééducation (quotidienne ou au minimum 5 jours par semaine). La rééducation doit durer au minimum 8 semaines, et aussi longtemps qu'elles sont capables de participer et de montrer un bénéfice mesurable du traitement. (11)

La récupération de la fonction motrice est due à la réorganisation cérébrale permise grâce à la plasticité qui permet d'envisager une récupération maximale (sans compensation). Pour être

optimisée, la plasticité cérébrale doit être stimulée grâce à des exercices ciblant les fonctions déficientes. Cela va passer par une prise en charge pluriprofessionnelle, pouvant faire intervenir le kinésithérapeute, l'ergothérapeute, l'orthophoniste, l'orthésiste, le psychomotricien, le neuropsychologue, l'enseignant en activité physique adaptée...

Selon la HAS, les moyens de rééducation sont multiples (1). Elle liste les différentes méthodes de rééducation de la fonction motrice comme la rééducation de la sensibilité (proprioceptive notamment pour assurer un bon contrôle), la rééducation manuelle individuelle (mobilisations passives et actives), l'activité physique et programme d'exercices gymniques, le renforcement musculaire (amélioration de la trophicité et de la performance musculaire), la rééducation intensive (nombre élevé de répétitions), les approches neurophysiologiques (Bobat, Brunnström, Kabat, Rood), l'apprentissage moteur ou encore la répétition de tâches ou tâches orientées. Aucune approche de la rééducation motrice n'est plus ou moins efficace pour favoriser la récupération de la fonction selon Pollock et al, un mélange de ces différentes techniques reste à ce jour le moyen de rééducation le plus efficace (12).

Mais dans le cadre de ce mémoire, c'est la rééducation de la marche qui va particulièrement nous intéresser. En effet, la reprise de la marche est une priorité en kinésithérapie car c'est une activité déterminante pour l'autonomie, la participation sociale et la qualité de vie du patient (13). Avant de parler de la rééducation à la marche après un AVC, nous allons définir ensemble ce qu'est la marche.

2. Marche

2.1. Cycle de la marche

La marche est l'activité humaine la plus naturelle et la plus économique pour se déplacer. C'est une fonction automatique caractérisée par une activité alternée des MI avec la succession d'une phase de double appui, d'une phase de simple appui et d'une phase oscillante (14).

Bouisset et Maton (15) ont défini la marche comme un « déplacement consistant en une translation de l'ensemble du corps, consécutive à des mouvements de rotations articulaires ». La marche provoque un déséquilibre permanent puisqu'elle sort la projection du centre de masse en dehors du polygone de sustentation, avant de le ramener dedans en projetant son MI. La marche est donc une répétition de mouvements des membres du corps destinée à déplacer l'ensemble du corps vers l'avant tout en gardant l'équilibre.

La marche, pour pouvoir être analysée, est découpée en certaines phases, événements, qui constitueront ce qu'on appelle un cycle. Un cycle de marche ne regarde qu'un seul MI (ici le droit), il commence habituellement au contact du pied et se termine au même événement, un

pas plus tard donc. C'est ainsi que l'on va pouvoir différencier la marche de la course. En effet, lors de la course, lorsqu'un pied est en appui, l'autre est en l'air. En revanche, pendant la marche, on observera une phase de double appui.

On considère qu'un cycle représente 100%, puisque chaque évènement va être décrit en pourcentage. Un cycle possède deux phases principales (Figure 3):

- La phase d'appui (environ 60%) composée elle-même de 4 phases :
 - o Une phase de mise en charge (10%), durant laquelle aura lieu le contact initial. Le MI gauche touche encore le sol, c'est donc une phase de double appui de réception. Cette phase permet le transfert de poids vers la jambe droite.
 - o Une phase de milieu d'appui (20%), le pied prend contact complètement sur le sol (phase plantigrade). Elle permet au corps d'avancer au-dessus du pied d'appui. Cette phase, unipodale, se termine lorsque le talon se décolle.
 - o Une phase de fin d'appui (20%), toujours unipodale. Le poids du corps est transféré sur l'avant pied. Cette phase se termine lorsque le MI gauche prend contact avec le sol.
 - o Une phase pré-oscillante (10%), qui prépare la phase oscillante. C'est une phase de double appui de propulsion. Les orteils quittent progressivement le sol. Cette phase se finit lorsque l'hallux décolle du sol.

- La phase oscillante (environ 40%) composée de 3 phases aussi longues les unes que les autres, elle permet l'avancée du MI oscillant :
 - o La phase de début d'oscillation, premier tiers. C'est une phase d'ascension permise par une triple flexion du MI, qui raccourcit le membre et permet le passage du pas.
 - o La phase de milieu d'oscillation, deuxième tiers. Elle se termine lorsque le tibia est vertical.
 - o La phase de fin d'oscillation, troisième tiers. C'est une phase descendante, préparant le cycle suivant et la réception au sol.

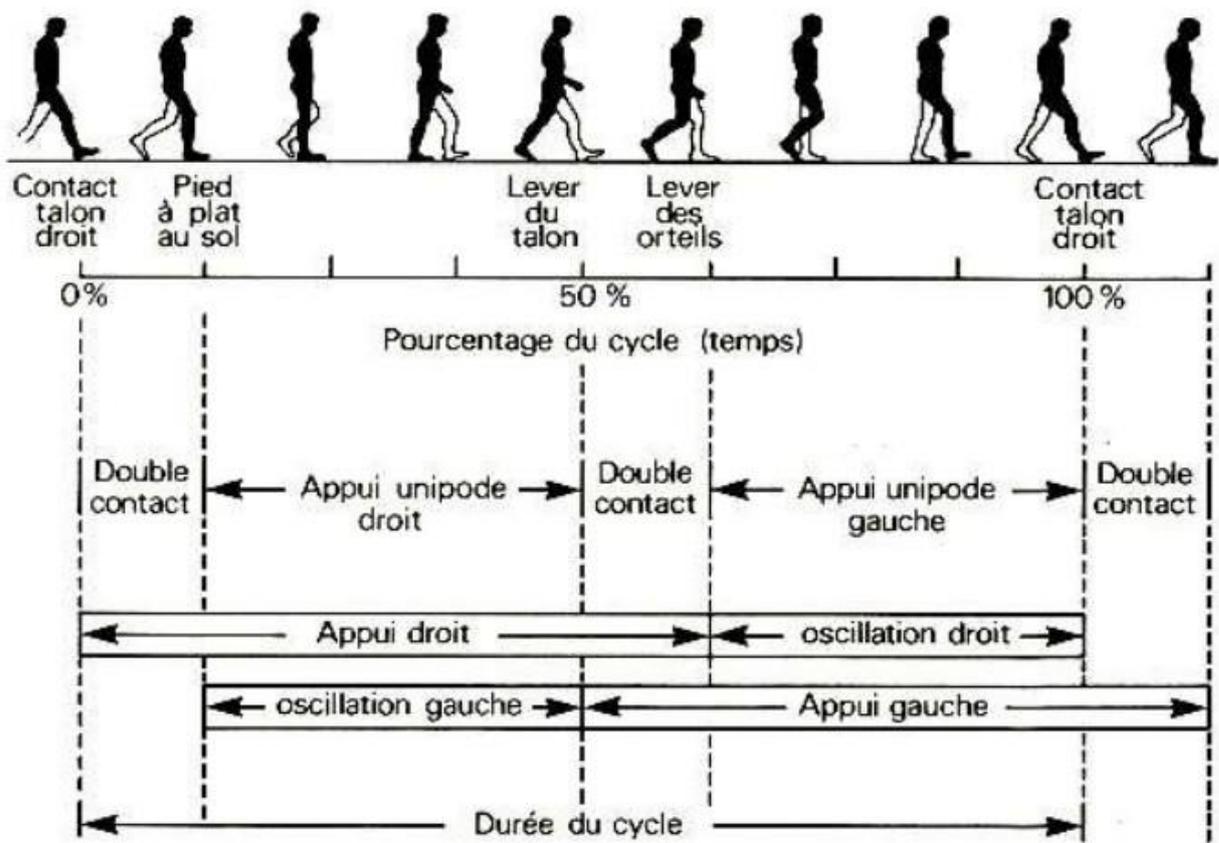


Figure 3 : Cycle de la marche selon Viel (14)

Gage, a défini 5 prérequis nécessaires pour caractériser une marche de normale : la stabilité lors de la phase d'appui, une liberté au passage du pas, un positionnement du pied correct à la fin de la phase oscillante, une longueur de pas adaptée et une conservation de l'énergie. Si l'un de ces prérequis n'est pas présent, on peut parler de marche pathologique (16).

2.2. Paramètres de la marche

La marche peut être décrite par différents paramètres. On les regroupe en deux catégories :

- Les paramètres spatiaux
 - La longueur de pas, soit la distance en mètres (m) entre l'endroit où est posé le talon droit ou gauche et l'endroit où se posera le même talon.
 - La largeur de pas ou l'écartement des deux pieds dans le plan frontal, normalement comprise entre 10 et 20 cm (17).
 - L'angle de pas, représente l'ouverture du pied sur le côté.
 - Le périmètre de marche, qui est la distance en m pouvant être parcourue sans pause, liée à la fatigabilité et à l'endurance cardio-pulmonaire et musculaire.

- Les paramètres temporels
 - La cadence de marche, nombre de pas par min, entre 85 et 150 pas/min (18).
 - La vitesse de marche, calculée en m/s, varie de 0,7 à 1,5 m/s chez un adulte sain pour une vitesse de marche confortable (18).
 - Le temps de marche.
 - Le temps d'appui unipodal.

2.3. Contrôle neurologique

La marche est un comportement intentionnel, orienté vers un but, initié par des signaux provenant soit du traitement volontaire dans le cortex cérébral, soit du traitement émotionnel dans le système limbique (19).

Le processus neurologique de la marche est intimement lié à celle de la posture, puisque le contrôle postural est nécessaire à la marche. Que l'initiation de la marche soit volontaire ou émotionnelle, la marche s'accompagne de processus de mouvements automatiques contrôlés, tels que l'ajustement du tonus musculaire postural et des mouvements rythmiques des membres.

Le contrôle de la posture et de la marche est assuré par des systèmes répartis sur toute l'étendue du système neurologique central.

Concrètement, la marche est un mouvement actif composés de mouvements réflexes, automatiques et intentionnels :

- Le processus volitif est dérivé de commandes motrices intentionnellement provoquées par le cortex cérébral. Ce processus nécessite l'activation de diverses zones corticales et est exécuté par les projections du cortex cérébral et de la colonne vertébrale.
- Le processus émotionnel est évoqué par des projections de l'hypothalamus limbique vers le tronc cérébral, ce qui entraîne des comportements moteurs émotionnels tels que des réactions de combat ou de fuite.
- Le processus automatique est déclenché par des activations séquentielles des neurones dans le tronc cérébral et la moelle épinière (19). Le schéma moteur de la marche de base est généré par les réseaux internes de la colonne vertébrale, ou générateur spinal de marche. Ce dernier est un réseau de neurones qui transforme le message du cortex cérébral en activité rythmique.

Les informations multisensorielles telles que les sensations somatosensorielles, visuelles et vestibulaires agissent sur différentes zones du cerveau afin de permettre un contrôle adaptable de la posture et de la démarche (20).

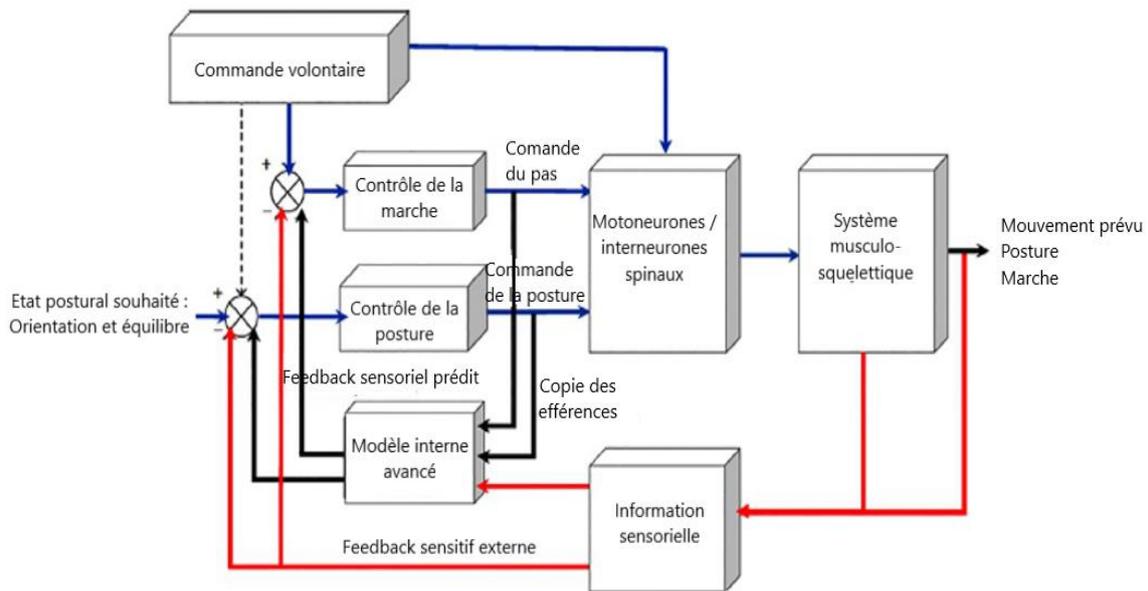


Figure 4 : Modèle général de l'organisation du contrôle postural, de la marche et du mouvement volontaire, traduit en français (21)

Le modèle présenté dans la Figure 4 nous montre que la commande volontaire d'un mouvement, ici le pas, doit être couplée à des réseaux parallèles de contrôle de la marche et de contrôle postural. Les composantes essentielles du système nerveux qui permettent d'atteindre ces objectifs comprennent les informations fournies par les systèmes sensoriels (visuel, vestibulaire et somatosensoriel).

Ces systèmes donnent une rétroaction sur l'emplacement et le mouvement des objets dans l'environnement extérieur, l'orientation et le mouvement de la tête et du corps dans l'espace, et la position et le mouvement relatifs des segments du corps.

Les centres supra spinaux d'ordre supérieur planifient, initient et exécutent des mouvements en fonction d'objectifs, de récompenses et d'entrées multisensorielles. Et les centres sous-corticaux d'ordre inférieur (noyaux du tronc cérébral et moelle épinière) intègrent des commandes motrices avec des rétroactions multisensorielles pour garantir que les actions volontaires et automatiques sont couplées à des ajustements posturaux appropriés (21).

Une fois que tout est mis en place et qu'il y a eu un retour des informations sensorielles, le mouvement est déclenché.

Pour conclure, la marche est un mouvement déclenché volontairement, et qui une fois débutée est une activité rythmique réflexe contrôlée par le générateur spinal de la marche. Elle est régulée également par les émotions (combat, fuite), et toutes les sensations fournies par les systèmes sensoriels (visuel, vestibulaire, proprioceptif). C'est donc un phénomène très complexe.

2.4. Marche du patient post-accident vasculaire cérébral

La marche d'un patient présentant une hémiparésie est classiquement décrite comme une marche possédant une boiterie dite de fauchage. C'est une anomalie de la marche dans laquelle le MI atteint reste tendu et passe à distance de l'axe du corps lors du passage du pas, imitant le mouvement circulaire d'une faux (22). Le MI ne peut se raccourcir à cause du déficit de motricité volontaire des fléchisseurs.

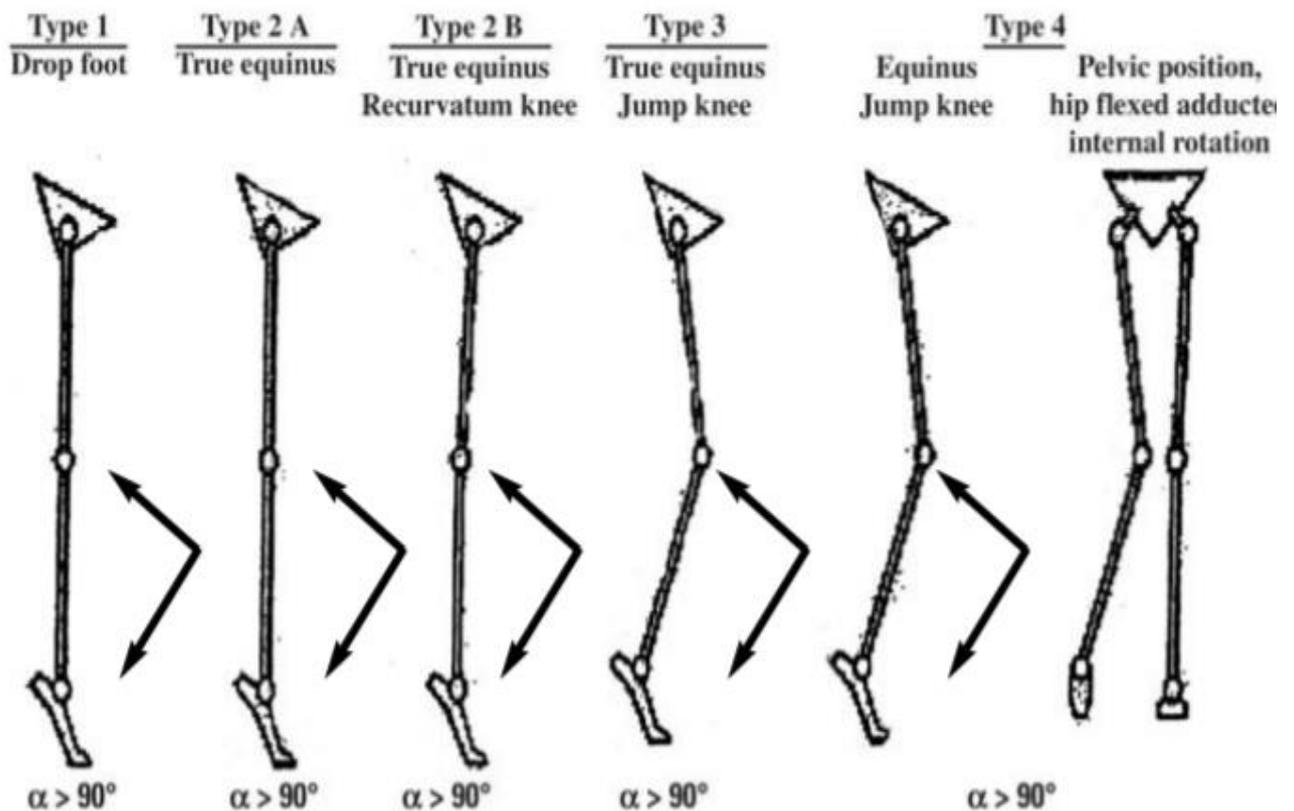


Figure 5 : Classification de la marche de l'hémiparétique spastique selon Winters (23)

Winters et al ont proposé une classification de la marche d'un patient hémiparétique selon le type d'atteinte (Figure 5) (23) :

- Le type 1 appelé « drop foot », caractérisé par un manque de flexion dorsale de cheville (faiblesse des releveurs ou co-contraction spastique des fléchisseurs plantaires). L'attaque du pas ne se fait donc pas par le talon mais par la plante ou la pointe du pied.
- Le type 2 « true equinus », caractérisé non pas par un manque de flexion dorsale mais par une flexion plantaire de cheville induite par la rétraction des muscles fléchisseurs

plantaires (majoritairement le triceps sural, le tibial postérieur et le long fléchisseur des orteils) avec une variante « true equinus recurvatum knee »

- Le type 3 « true equinus / jump knee » reprend les défauts du type 2 en y associant un déficit de flexion du genou. Le MI ne peut se raccourcir pour le passage du pas, et compense en fauchant ou en montant sur le pied controlatéral.
- Le type 4 possède toutes les caractéristiques du type 3 mais possède également un déficit aux fléchisseurs et adducteurs de hanche.

La marche d'un patient hémiparétique est caractérisée par une diminution de la vitesse de marche, afin de compenser notamment le surcoût énergétique (24). Même si ce n'est pas le meilleur facteur de prédisposition à la chute chez les patients post-AVC, (25) la vitesse de marche n'en est pas moins un facteur de risque si elle est trop basse. On va donc pouvoir la surveiller et vouloir l'améliorer. La phase d'oscillation est plus lente, pour assurer un meilleur équilibre, tout comme les phases de double appui sont aussi rallongées pour optimiser la sécurité de la marche. L'hypertonie spastique, la diminution de force musculaire, le déficit de commande volontaire ou la position anormale du pied sont autant de raisons qui font que la marche d'un patient hémiparétique est coûteuse, complexe et peu sûre.

Pour évaluer la marche d'un patient hémiparétique vasculaire, la Functional Ambulation Classification (FAC) (Annexe I.I) est souvent utilisée (26). Elle permet de décrire précisément l'amélioration des performances de marche du patient, tout en incluant l'aide d'une tierce personne, comme le kinésithérapeute en centre de rééducation. Cependant, la FAC modifiée (Annexe I.II) est plus précise notamment pour les patients en fin de rééducation lorsqu'il faut prendre compte de la qualité de la montée et descente d'escaliers (27).

2.5. La rééducation de la marche d'un patient post-accident vasculaire cérébral

2.5.1. Présentation des méthodes « conventionnelles »

« La rééducation de la marche après un AVC est l'ensemble des processus de restauration des différents paramètres de la locomotion bipédique d'une personne ayant présenté une hémiparésie vasculaire, dans le but de lui permettre de restaurer un maximum d'indépendance et de se déplacer de la manière la plus sûre et économique possible » (1). Elle est recommandée dès que possible, et tout au long de l'évolution de l'AVC, lors de la phase aiguë, subaiguë et chronique.

La rééducation à la marche post-AVC est réalisée dans un premier temps grâce aux différentes approches neurophysiologiques (Bobath, Brunnström, Kabat...) , bien qu'aucune d'entre-elles ne soit centrée sur la marche (28). Ces méthodes vont cibler le dysfonctionnement musculaire,

comme un tonus musculaire anormal, des synergies de flexion et d'extension, une faiblesse musculaire et de manière générale des schémas de mouvements dysfonctionnels (24).

Elle est aussi réalisée grâce à des exercices dits tâche-orientée, comme l'entraînement sur tapis roulant avec ou sans support de poids, des exercices comprenant une répétition de mouvements, ou encore des exercices de double tâche (29). L'entraînement intensif et répétitif tâche-orientée va permettre d'obtenir certains bénéfices dans la rééducation, comme l'amélioration du périmètre de marche, ou de la fonctionnalité de la marche (30,31).

L'entraînement à la marche par kinésithérapie au sol, avec des aides simples, comme des barres parallèles est la forme la plus courante de pratique clinique, à n'importe quel stade post-AVC. Cependant, il n'y pas assez de preuves scientifiques pour démontrer un effet significatif de cette stratégie de rééducation sur le long terme, malgré une amélioration de la vitesse de marche, du score au « Timed Up and Go » et de la distance de marche en six min à court terme (32).

L'entraînement sur tapis roulant avec le soutien plus ou moins partiel du poids du corps permet au patient de réaliser une marche coordonnée tout en contrôlant les exigences en matière de contrôle postural ainsi que la vitesse de marche (24). Dans une revue Cochrane, Merholz et al ont conclu que les patients recevant un entraînement sur tapis roulant n'étaient pas plus susceptibles d'améliorer leur capacité de marcher de manière indépendante que les autres patients, mais que la vitesse de marche et le périmètre de marche pouvaient s'améliorer (33).

De manière globale, les approches thérapeutiques se doivent d'être combinées afin d'obtenir un meilleur résultat.

2.5.2. La place des systèmes robotisés dans la rééducation de la marche

L'utilisation de nouvelles technologies comme la rééducation robot-assistée est de plus en plus développée. Selon la HAS, « la rééducation assistée par robotique consiste à réaliser des mouvements contraints par un système électromécanique, couplée ou non à un environnement virtuel (EV) » (1). Le mouvement peut être libre, totalement guidé ou assisté. La HAS recommande cette méthode lors de la rééducation post-AVC de la marche, associé à la kinésithérapie à la phase subaigüe (grade B).

Le « Gait Trainer » (GT) ou le Lokomat (Figure 6) sont des exemples d'appareils robotisés de rééducation à la marche pour les patients cérébrolésés. Ils permettent au patient un entraînement répété de simulation à la marche, avec une suspension plus ou moins partielle du poids du corps. La marche assistée mécaniquement, avec un support partiel du poids du patient est recommandée chez les patients non-marchants (1).

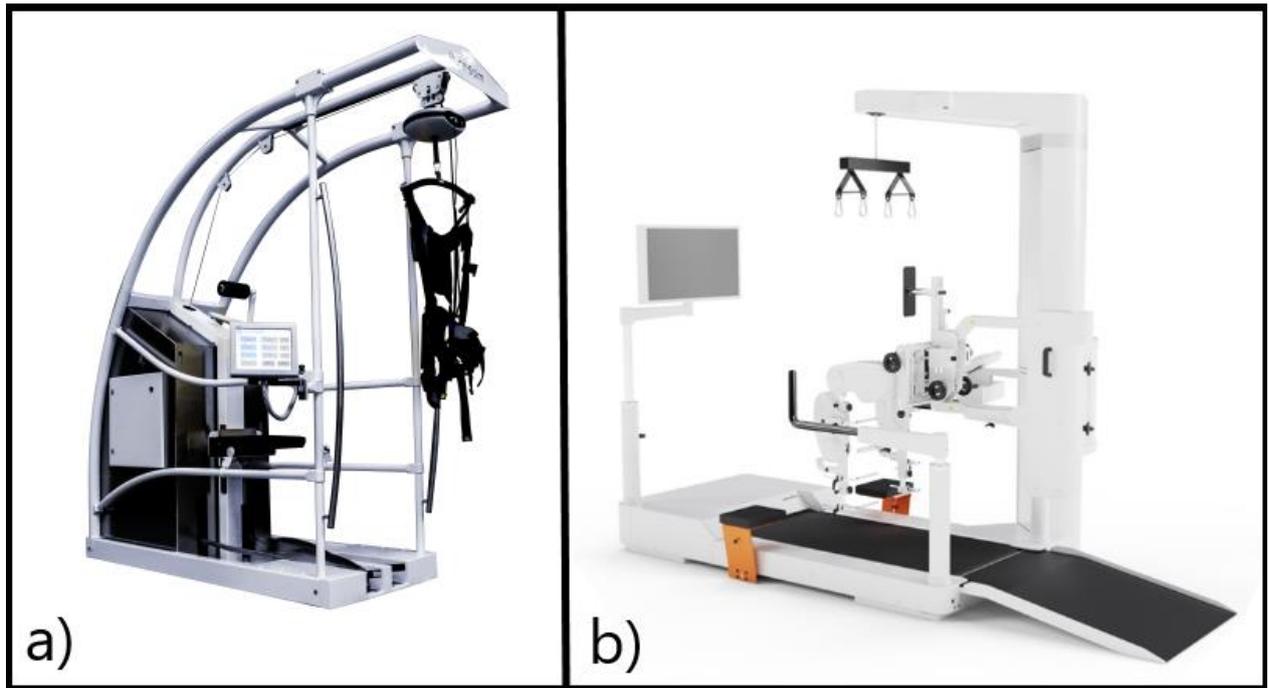


Figure 6 : Exemple d'appareils robotisés de rééducation à la marche avec a) Gait Trainer GT II Rehaslim ® et b) Lokomat ®

Dans une revue systématique, Mehrholz et al ont montré l'efficacité de l'entraînement électromécanique à la marche associée à de la kinésithérapie dans la réalisation d'une marche indépendante après un AVC, comparée à des techniques dites classiques de rééducation à la marche. Ici, quatre semaines de cet entraînement ont suffi à surpasser les traitements classiques en terme d'indépendance, mais pas en terme de vitesse de marche, puisqu'il n'y aurait pas eu d'effets significatifs (34). Tedla et al dans une autre revue systématique ont eux aussi montré qu'un entraînement robotisé à la marche avait des résultats identiques voire meilleurs qu'une rééducation conventionnelle à la marche (35). Dans cette dernière revue systématique, les séances d'entraînement robotisé étaient de 30 min à 1h, 3 à 4 fois par semaine et durant 8 à 10 semaines, donc entre 12 et 25 sessions par patient. Une intensité élevée aurait donc de meilleurs résultats (35). Freivogel et al, en plus de montrer eux aussi l'efficacité de la rééducation robotisée, ont montré que d'utiliser une assistance électronique, réduisait l'inconfort du kinésithérapeute par une diminution de la charge de travail. Cela permet donc d'améliorer la prise en charge (36). Dans les phases précoces de l'AVC, le soutien plus ou moins complet du poids du corps permet de commencer la rééducation à la marche de patients non marchant assez tôt.

3. Réalité virtuelle

3.1. Définition, avantages et limites

La réalité virtuelle (RV) est habituellement définie comme un domaine scientifique et technique exploitant les sciences informatiques et les interfaces comportementales (37).

Dans les différentes études réalisées à ce jour, une importante disparité existe sur le terme de RV (38). En effet, les EV peuvent varier en fonction du degré d'immersion de l'utilisateur (Figure 7). Il existe des EV à faible immersion comme une projection sur un seul écran ou un affichage de bureau, et des EV dits immersifs, comme les systèmes qui comprennent la projection sur une surface concave ou dans des casques de RV (39).

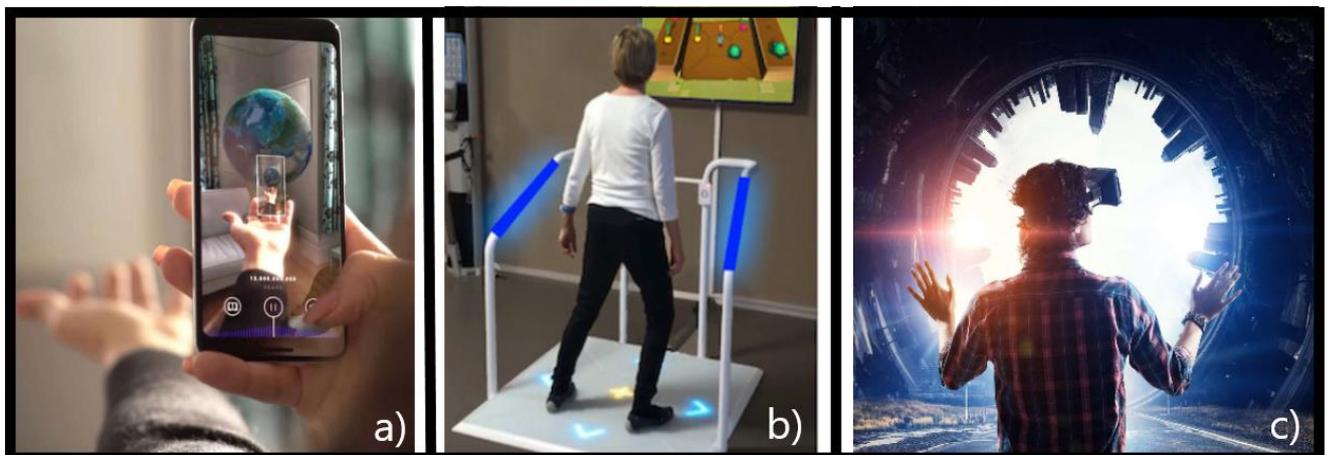


Figure 7 : Différents environnements virtuels
a) Réalité augmentée b) Projection sur un écran c) Réalité virtuelle immersive

Bien que sa création n'ait aucun lien avec le monde médical et la rééducation, la RV prend une place prépondérante dans la recherche en kinésithérapie ces temps-ci (39). Effectivement, la RV est très appréciée en rééducation car elle permet de créer un « environnement standardisé, reproductible et contrôlable » (37). Elle permet de fournir un retour multisensoriel immédiat, avec une variation des tâches, une progression quantifiable des objectifs et un entraînement répétitif orienté sur une tâche précise.

Cependant, la RV présente quelques limites. Le premier est assez conséquent, la RV peut provoquer des effets indésirables (EI) telles que des nausées, désorientations ou céphalées. Ces EI peuvent apparaître selon les patients ou la durée de port de l'appareil (40). Le déplacement dans l'EV comparé à celui dans le monde réel peut également entraîner des nausées. Être stationnaire dans le monde réel peut induire un plus grand conflit dans un EV où il y a du mouvement et donc peut augmenter les symptômes de nausée. On peut observer une réduction des symptômes lorsque le mouvement initié par l'utilisateur est adapté à l'EV (41).

De plus, selon la qualité du matériel de RV, il faut être attentif à la latence du système. Cela va correspondre au délai de temps des différentes étapes d'acquisition des données grâce aux capteurs jusqu'au rendu visuel) (37). La perception des distances serait également sous-évaluée en RV selon Morel et al (37).

3.2. La réalité virtuelle dans la rééducation post-accident vasculaire cérébral

Un grand nombre d'études ont été réalisées pour montrer l'intérêt de l'utilisation de la RV dans le domaine de la rééducation, et notamment celle de la rééducation post-AVC (39).

L'augmentation de la motivation est un apport majeur de la RV immersive (42). Chez les jeunes adultes, en comparant 3 exercices de cyclisme, le premier en VR immersive, le second en VR non-immersive et le troisième sur un vélo stationnaire, Liu et al ont observé que la motivation était la plus grande lors du premier exercice. De plus, l'amotivation relevée lors de la session de VR non-immersive était plus importante (42).

L'ajout d'une interface ludique permet donc d'améliorer la motivation et peut permettre la pratique simulée de tâches fonctionnelles à un dosage plus élevé que les thérapies traditionnelles (43). Or, c'est la répétition intensive d'une tâche qui va peut-être pouvoir donner lieu à des bénéfices dans certains aspects de la rééducation (31). Cet EV va permettre un détournement d'attention de la fatigue ou de la lassitude du patient à propos d'une tâche motrice pouvant être répétitive.

Tout comme la rééducation robotisée, la rééducation post-AVC par la RV est présente dans les recommandations de la HAS (1). Dans la rééducation à la marche de patients post-AVC, la RV a apporté de meilleurs résultats lorsqu'elle était associée à des thérapies conventionnelles de marche plutôt qu'à des thérapies conventionnelles seules (44). Zhang et al ont constaté une amélioration de la vitesse de marche avec l'apport de la RV (45).

Les études qui associent la RV à une immersion totale en trois dimensions sont rares. Knobel et al ont montré en 2020, que la RV immersive, était aussi efficace que les traitements conventionnels quant à la rééducation de la NSU. Au-delà de ce résultat, leur étude nous permet de savoir que l'application d'une RV immersive est bien acceptée, agréable et ne provoque pas d'EI pour les patients victimes d'un AVC (46). C'est également le cas de deux autres études, celle de Weber et al et celle de Lee et al, chez qui les patients post-AVC en situation d'immersion totale n'ont pas observé d'EI (47,48). Cependant, dans ces études, les patients sont stationnaires.

Une étude sur des patients âgés présentant une maladie de Parkinson a observé les effets potentiels de l'utilisation de la RV immersive en situation dynamique sur tapis de marche. Cette

étude n'a pas observé d'apparition de symptômes physiques liés à la technologie. Il y a donc un intérêt réel de l'utilisation de la RV immersive lors de la rééducation à la marche (49).

3.3. La réalité virtuelle et l'assistance robotisée

L'association de la RV et d'une assistance robotisée a été observée par Zimmerli et al en 2013. Les résultats de cette étude montrent qu'un feedback fonctionnel est très important lors de la rééducation robot-assistée, afin d'obtenir une participation active de la part du patient. Cette participation active est primordiale pour une meilleure récupération fonctionnelle (50).

Clark et al ont eux aussi associés la RV et la rééducation robotisée, mais sur la rééducation du MS. Ils dénoncent un manque flagrant d'études combinant la RV et les technologies robotisées (51).

Une première étude de 2019, menée par De Keersmaecker et al, a utilisé le Lokomat, un dispositif de rééducation robotisée, et a regardé la participation active de sujets sains avec ou sans la RV immersive. Ces derniers ont bien toléré la RV malgré le défilement (52). Une deuxième étude a combiné la RV et la rééducation robotisée à la marche. Seulement cette étude a utilisé la réalité augmentée, l'environnement était projeté sur un écran devant les patients (53). L'étude a observé une augmentation du temps des séances et une plus grande motivation.

Enfin, Winter et al ont utilisé la RV immersive mais sur un tapis de marche. (54) Ils ont comparé la marche sur tapis roulant avec un système immersif, un système semi-immersif et un entraînement conventionnel chez des personnes saines et des patients ayant présenté un AVC, ou une maladie de Parkinson. Ils ont observé une grande facilité d'utilisation et peu d'effets secondaires, ainsi qu'une amélioration de la motivation et de la vitesse de marche.

3.4. La réalité virtuelle et la tolérance en rééducation

La tolérance est une notion assez décriée du fait de sa subjectivité et de son utilisation dans de nombreux domaines. Nous allons entendre par tolérance, l'aptitude de quelqu'un à supporter les effets d'un agent extérieur, en l'occurrence, l'aptitude du patient à supporter les moyens mis en place par le masseur-kinésithérapeute. Une non-tolérance peut donc entraîner des EI, appelés cybercinétose, telles que des nausées, désorientations ou céphalées. Ces symptômes sont clairement définis et séparés en trois catégories, les nausées, les troubles oculomoteurs et la désorientation (55).

La cybercinétose est une sensation désagréable réunissant ces symptômes et résultant de l'exposition à des environnements de RV immersive. La cybercinétose est donc liée au mal des transports ou au mal de mer, cependant dans ces derniers, c'est le mouvement physique du véhicule qui déclenche les symptômes, la cybercinétose, elle, est induite visuellement (56).

Aucune théorie à ce jour ne peut expliquer de manière complète la cause de cybercinétose. Une théorie reprise par plusieurs auteurs expliquant en partie ces symptômes est celle du conflit sensoriel entre les entrées sensibles visuelles de l'EV et les entrées sensibles vestibulaires, et leur absence de correspondance (57–59). Bles et al sont allés encore plus loin en abordant la notion de verticale subjective. La verticale subjective est formée à partir d'informations des différents sens, la vision, la proprioception ou les organes vestibulaires. Cette verticale subjective est nécessaire aux interactions avec le monde nous entourant. Les informations sensorielles construisent un modèle de cette verticale attendue, et détectent en même temps la verticale subjective réelle. Une différence entre ces deux verticales provoque l'apparition de symptômes de cybercinétose (59). Mais cette théorie laisse complètement inexpliquée l'apparition de nausées (60). Une autre théorie est retenue par Treisman, la théorie du poison. Les déséquilibres sensoriels sont un système d'alerte précoce lorsqu'un animal a ingéré des toxines. La nausée est donc une réponse adaptative et évoluée au conflit sensoriel visant à débarrasser l'animal des toxines dangereuses (61). Enfin, une autre théorie serait celle de l'instabilité posturale prolongée. Les personnes seraient susceptibles de déclencher des symptômes de cybercinétose lorsqu'ils sont exposés à de nouvelles situations pour lesquelles ils n'ont pas de stratégies existantes (62).

Plusieurs facteurs sont associés à la cybercinétose. Le genre est un premier facteur, les femmes seraient plus susceptibles de déclencher des symptômes de cybercinétose (63,64). Ce phénomène serait amené à évoluer durant le cycle menstruel du fait des hormones, mais les explications physiologiques sont incomplètes (65). Cependant, toutes les études ne vont pas dans ce sens, Saredakis et al. n'ont pas trouvé de différence significative liée au genre dans leur méta-analyse de 2020, tout comme Pot-Kolder et al. en 2018 (40,41). La durée du port de l'appareil, le choix du matériel de RV et le logiciel utilisé ainsi que la qualité de l'EV sont d'autres facteurs d'apparition de cybercinétose. (40)

Lors de l'immersion, le sentiment de présence (SdP) est associé à ces EI. Plus le SdP est important et moins important seront les EI (66). La présence est un état de conscience lors duquel la personne a le sentiment d'appartenir à l'EV (67). Ce SdP va être subjectif et propre à la personne contrairement au degré d'immersion. Il va dépendre de nombreux facteurs tels que le champ de vision, le décalage sensoriel, l'intuitivité de l'interaction ou le contrôle de la navigation (66).

Le phénomène d'habituation est également à prendre en compte dans l'apparition d'EI. Howart et al. le définissent comme un processus par lequel la réponse au même stimulus diminue à la suite de présentations répétées. Ce phénomène est à différencier de l'adaptation qui lui va être un changement un peu plus immédiat de la sensibilité, impliquant généralement un organe sensoriel (68). Kennedy et al. retrouvent ce phénomène, et notent que l'augmentation de la

durée d'exposition et l'augmentation du nombre d'expositions ont toutes deux un effet significatif sur la réduction des symptômes de cybercinétose (69).

Les symptômes de cybercinétose ont un impact sur le confort mais également sur la sécurité du patient. En effet, les troubles de la déglutition sont fréquemment retrouvés chez des patients AVC, un vomissement pourrait entraîner une fausse route et donc un étouffement. Une perte d'équilibre dû à la désorientation est également à anticiper. La sécurité sera donc importante dans les dispositifs de rééducation incluant de la RV.

Des études récentes ont pu observer une bonne tolérance à la RV immersive, sans apparitions d'EI (46–48), seulement ces études se portent sur le MS et n'impliquent pas le corps en entier. Il est donc nécessaire de réaliser une étude de tolérance lors d'un dispositif rééducatif contenant de la RV immersive impliquant les MI, avant de regarder son efficacité.

Problématique

L'AVC est défini comme « l'arrêt brutal de la circulation sanguine au niveau d'une partie du cerveau »(1). On dénombre en France plus de 140 000 nouveaux cas d'AVC par an (3). L'AVC est un facteur de risque majeur de dépendance, puisque 60% des patients post-AVC présentent un handicap séquellaire qui gêne la réalisation des activités de la vie quotidienne (1).

Parmi les différents objectifs de rééducation post -AVC, la reprise de la marche est une priorité en kinésithérapie car c'est une activité déterminante pour l'autonomie, la participation sociale et la qualité de vie du patient (13). La récupération de la fonction motrice est due à la réorganisation cérébrale permise grâce à la plasticité qui permet d'envisager une récupération maximale. L'utilisation de nouvelles technologies comme l'assistance robotisée à la marche a montré son efficacité pour la reprise de la marche des individus AVC non-marchants (34–36). Cependant, la répétition de cette tâche spécifique peut entraîner une baisse de la motivation et de la participation active du patient.

C'est pourquoi, le couplage à la RV immersive pourrait être intéressant. En effet, la RV permet au patient d'interagir avec un EV dans lequel il peut se déplacer, et ainsi augmenter son attention et sa motivation (39). Cet EV exerce un détournement d'attention de la fatigue ou de la lassitude du patient à propos d'une tâche motrice pouvant être répétitive. Il faut néanmoins faire attention car des EI telles que des nausées, désorientations ou céphalées peuvent apparaître selon les patients, la durée de port de l'appareil (40).

Dans la littérature, il y a une absence d'association de ces deux technologies. Il est donc nécessaire d'étudier la tolérance de l'immersion en RV lors de séances de rééducation de la marche robot-assistée chez des sujets sains, avant de pouvoir l'appliquer sur des sujets ayant présenté un AVC.

L'objectif principal de cette étude sera d'observer la tolérance à travers l'apparition d'EI.

Les objectifs secondaires seront :

- observer la présence ou non d'un phénomène d'habituation au cours des séances
- décrire le lien entre le SdP et l'apparition d'EI
- décrire l'utilisabilité du système

Matériel et méthode

1. Design de l'étude

1.1. Description de la population

L'intervention devait être proposée dans le cadre de la prise en charge rééducative des patients hospitalisés dans le service de Médecine Physique et de Réadaptation (MPR) du Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Limoges dans les suites d'un AVC. Cependant, les courts délais ne nous permettent pas de mettre en place ce qui était prévu au préalable. Nous réalisons donc une étude de tolérance sur des sujets sains. Le recrutement des participants a été donc sur la base du volontariat. Cette étude a été proposée aux étudiants de l'Institut Limousin de Formation aux METiers de la Réadaptation (ILFOMER), ainsi qu'aux doctorants et masters du laboratoire de recherche Handicap, Activité, Vieillesse, Autonomie, Environnement (HAVAÉ) et du personnel du service de MPR du CHU de Limoges.

1.2. Critères d'éligibilité

1.2.1. Critères d'inclusion

- Individu sain majeur volontaire (>18 ans)

1.2.2. Critères de non-inclusion

- Pathologies contre indiquant l'utilisation de la RV (troubles épileptiques, syndrome cérébelleux majeur)
- Incapacité à évoluer dans un EV (MSSQ-Short > 26)
- Troubles aigües cardiovasculaires et respiratoires
- Personne présentant des troubles cognitifs
- Personne faisant l'objet d'une mesure de protection légale ou hors d'état d'exprimer son consentement
- Personne privée de liberté

2. Déroulement du protocole

2.1. Type d'étude

Il s'agit d'une étude observationnelle, transversale. C'est une étude monocentrique qui se déroule au sein du service de MPR du CHU de Limoges. Chaque volontaire réalise, dans le cadre de cette étude, deux séances séparées d'au moins 24h. Les passations sont réalisées lorsque le service est libre, soit entre 12h et 13h30 et entre 16h et 19h et ce, durant 3 semaines, du lundi 7 mars au vendredi 25 mars 2022.

2.2. Inclusion

2.2.1. Participants

Lors de la visite d'inclusion, le doctorant ou l'étudiant en 4^e année de kinésithérapie vérifie les critères d'inclusion, notamment les potentielles contre-indications à l'utilisation de la RV. Il informe le potentiel participant sur les modalités de l'intervention ainsi que sur ses droits. Il recueille les données personnelles comme l'âge, la taille et le poids du participant.

Les participants renseignent le « Motion Sickness Susceptibility Questionnaire » version courte (MSSQ-Short) pour évaluer le risque de survenue d'un malaise lors de l'utilisation d'un dispositif de RV. C'est un test permettant de mettre en évidence la propension à développer des symptômes physiques semblables au mal des transports (70). Le score est compris entre 0 et 54, les personnes présentant un score supérieur à 26 ont une trop grande susceptibilité à développer des symptômes de cyber maladies et ne sont donc pas incluses (48).

Une fois l'accord oral recueilli, le participant est inclus. Lors de son inclusion, un numéro d'anonymat est donné au patient : GTRV-GC-X, X allant de 1 au nombre de participants inclus.

2.3. Déroulement des séances

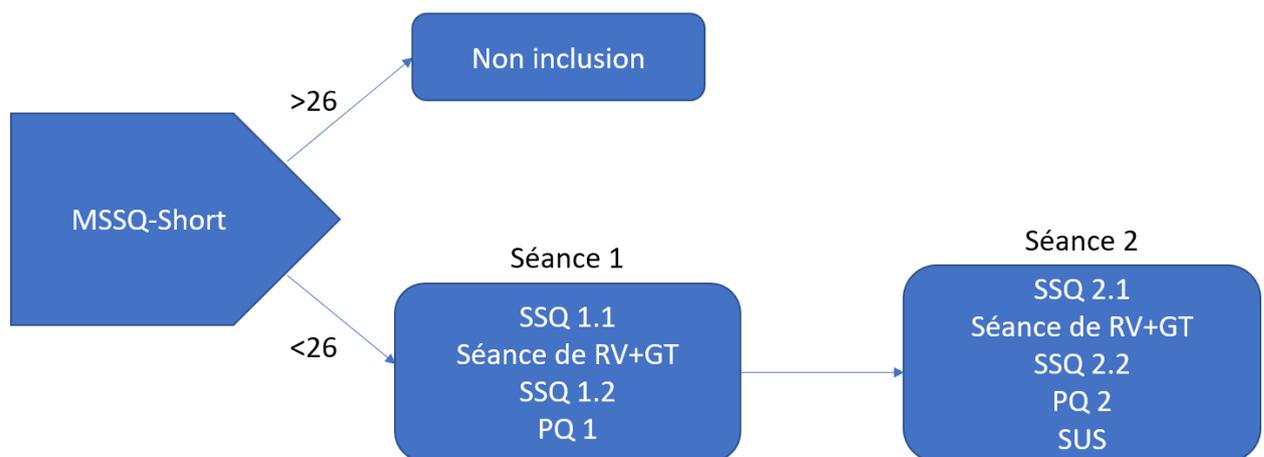


Figure 8 : Déroulement chronologique de l'étude

MSSQ-short : Motion Sickness Susceptibility Questionnaire short ; **SSQ** : Simulator Sickness Questionnaire ; **RV** : Réalité Virtuelle ; **GT** : Gait Trainer ; **PQ** : Presence Questionnaire

Les participants réalisent 2 séances de rééducation à la marche assistée par GT avec la RV (Figure 8). La séance de rééducation est réalisée sur un GT, le Gait Trainer GT1 présent au sein du service de MPR du CHU de Limoges. Lors de la première séance en RV, une familiarisation de l'EV est effectuée en position assise pendant 2 min. La scène virtuelle proposée est un espace naturel (i.e. forêt) de 360° créé à l'aide du logiciel Unity et diffusé

avec un visio-casque HTC Vive commercialisé par la société HTC®. Le sujet peut explorer l'environnement sans se déplacer. Si la personne ne tolère pas la RV, elle est exclue de l'expérimentation.

La vitesse de marche choisie est de 2 km/h pour les séances de GT. La longueur de pas est de 48 cm. Il leur est demandé d'accompagner le mouvement, de se concentrer sur leur marche et d'explorer l'environnement un maximum.



Figure 9 : Illustration du dispositif

La durée de la séance de rééducation à la marche est de 20 min. En cas de survenue de symptômes de cybercinétose, une pause est proposée au participant. En fonction de sa tolérance, nous lui proposons la possibilité de reprendre la séance tout en décomptant ce temps de pause du temps de la séance de rééducation. En cas de vomissements, la séance est stoppée et le participant sort du protocole expérimental. Dans ce cas, il est indiqué une sortie d'étude.

La durée approximative de passation pour chaque séance est de 45 min et comprend l'installation du participant, les 20 min de séance de GT et le temps de réponse aux questionnaires. A la fin de chaque séance, nous recueillons les remarques, points positifs et négatifs qui leur paraissent importants.

2.4. Variables étudiées

2.4.1. Critère de jugement principal

Le critère de jugement principal est la survenue de symptômes de cybercinétose. Le Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) est un questionnaire comportant 16 items évaluant différents symptômes physiques (Tableau 2). Créé à l'origine pour les simulateurs de vol, il peut être également utilisé pour objectiver la survenue de symptômes à la suite de l'utilisation de dispositif de RV (55,71). Les 16 items sont répartis dans trois catégories « Nausée », « Troubles oculomoteurs » et « Désorientation ». Chaque item correspondant à un symptôme peut être évalué de 0 à 3. Il est possible d'obtenir 4 scores, un pour chaque catégorie et un score total. Le score du SSQ final est compris entre 0 et 235,6. Un score inférieur à 5 est équivalent à une apparition négligeable de symptômes (72). Il est traduit par le laboratoire de cyberpsychologie de l'Université du Québec en Outaouais.

Tableau 2 : Simulator Sickness Questionnaire et sa notation

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

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

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

$$N = 1+6+7+8+9+15+16$$

$$O = 1+2+3+4+5+9+11$$

$$D = 5+8+10+11+12+13+14$$

$$T = (N+O+D) * 3,74$$

2.4.2. Critères de jugement secondaires

2.4.2.1. Sentiment de présence

Afin d'évaluer le SdP ressenti au cours de la séance au sein de l'EV proposé, nous utilisons le Presence Questionnaire (PQ) (Annexe IV) (73). Initialement conçu avec 32 items, la troisième version des mêmes auteurs, traduite et validée en français par le laboratoire de cyberpsychologie de l'Université du Québec en Outaouais, ne comporte plus que 19 items (74,75). Chaque item est évalué de 1 à 7. A ces 19 items, peuvent être rajoutés 5 items, si l'EV propose de l'audio ou de l'haptic (toucher). Les items sont regroupés en sous-échelles comme la qualité de l'interface ou la résolution. Le PQ a un score qui va de 19 à 133. Plus la note est élevée, plus le participant a un SdP important. Les items 14, 17 et 18 ont une notation différente, il suffit d'inverser l'échelle de Likert.

2.4.2.2. Utilisabilité du système

L'utilisabilité du système mis au point est évaluée à l'aide du « System Usability Scale » (SUS) (Annexe V). C'est un questionnaire permettant de mesurer la perception subjective de l'utilisabilité d'un système par les utilisateurs. La version française a été validée par Gronier et al. en 2021 (76). L'échelle est composée de 10 items, allant de « pas du tout d'accord » (1) à « tout à fait d'accord » (5). Les items recouvrent différents aspects de l'utilisabilité, tels que le besoin d'aide, la complexité, ou l'entraînement. Le score des items impairs (1, 3, 5, 7, 9) est la note moins 1. Le score des items pairs (2, 4, 6, 8, 10) est de 5 moins la note. Une fois les scores de chaque item calculés, ils sont additionnés. La somme est multipliée par 2,5 pour obtenir le score du SUS. Le score total du SUS peut donc aller de 0 à 100. Plus le score est élevé, plus la sensation d'utilisabilité est forte (77).

2.5. Données recueillies auprès des patients

Les questionnaires sont administrés par le kinésithérapeute ou l'étudiant en 4^{ème} année de kinésithérapie encadrant la séance sous forme d'interview. Le Tableau 3 récapitule les différents questionnaires à faire passer aux patients.

Tableau 3 : Recueil des données

	Séance Gait Trainer et réalité virtuelle	
	Séance 1	Séance 2
SSQ	X#	X#
SUS		X*
PQ	X*	X*
Durée	X	X
Nb pas	X	X

: questionnaire réalisé en pré et post séance ; * : questionnaire réalisé en post séance ; **SSQ** : Susceptibility Sickness Questionnaire ; **SUS** : System Usability Scale ; **PQ** : Presence Questionnaire

Ainsi, nous obtenons un SSQ 1.1, le score du SSQ pré séance 1, un SSQ 1.2, le score du SSQ post séance 1 et donc un SSQ 2.1 et un SSQ 2.2, respectivement les scores du SSQ pré séance 2 et post séance 2. La variable qui nous intéresse, est Δ SSQ. C'est la différence entre les scores post séance et les scores pré séance. Elle représente donc les EI qui sont réellement apparus lors de l'utilisation de la RV. Nous avons donc Δ SSQ 1 et Δ SSQ 2.

3. Matériel utilisé

3.1. Assistance robotisée à la marche

Les séances de rééducation à la marche assistée par robot se déroulent au sein du GT GT1 présent au sein du service MPR du CHU de Limoges (Figure 10). Il a été développé par la société REHA-STIM MEDTEC® suivant les travaux réalisés par le Pr Stefan HESSE. Ce dispositif est composé de deux plateformes parallèles réalisant les cycles de marche, et d'un harnais permettant une décharge du poids du corps ajustable. Cet outil permet de réaliser des cycles de marche de manière passive avec la possibilité d'adapter continuellement la décharge du poids du sujet, la longueur de pas, ainsi que la vitesse de marche. Lors des cycles de marche, les mouvements horizontaux et verticaux physiologiques sont contrôlés par le dispositif.



Figure 10 : Dispositif de rééducation à la marche robot-assistée Gait Trainer GT1

3.2. Casque de réalité virtuelle

Le casque de RV utilisé est le HTC Vive®, commercialisé par la société HTC®. Ce dispositif est composé d'un casque, de deux contrôleurs (manettes) ainsi que de deux stations de bases (caméras infrarouges) reliées par un système de wifi et permettant de suivre les déplacements de l'utilisateur dans l'espace (Figure 11). Un tracker est installé au niveau du pied droit pour visualiser le déplacement de chaque membre dans l'espace. Ce matériel est installé autour du GT au sein du service MPR du CHU de Limoges. Pour pouvoir utiliser ce matériel, un ordinateur avec un système d'exploitation Windows® (7, 8 ou 10) est nécessaire.



Figure 11 : Casque de réalité virtuelle HTC Vive ®

3.3. Programme informatique et environnement virtuel

Pour effectuer les séances en RV, un dispositif a été développé en collaboration avec l'école d'ingénieurs de l'Ecole National Supérieure d'Ingénieurs de Limoges (ENSIL). L'EV a été créé à l'aide du logiciel Unity et est diffusé dans un visio-casque HTC Vive®. Unity est un moteur de jeu développé par Unity Technologies® permettant de modéliser notamment des environnements utilisés en RV. L'utilisation de matériel de RV dans les environnements créés est permise par Steam VR qui est une plateforme de contenu de RV. La scène que nous avons créée représente un chemin rectiligne traversant un paysage composé de différents éléments naturels et citadins (Figure 12). Il a été réalisé à l'aide de l'outil « Forest Environment – Dynamic Nature » disponible sur Unity Asset Store, offrant une grande qualité de décors. Le programme nécessaire à la simulation du déplacement des sujets dans l'EV a été développé

sur Microsoft Visual studio et est écrit en C# (C sharp). Il permet de reproduire, dans l'EV, un déplacement physique lié aux mouvements effectués par le sujet sur le GT. Un déplacement fluide est obtenu à l'aide d'un capteur (tracker) du dispositif HTC Vive, placé au niveau du pied droit du sujet. Le déplacement du tracker est repéré par des caméras infrarouges et un programme informatique transmet les mouvements physiques des participants à l'EV. Ainsi, un mouvement de translation (gauche-droite et haut-bas) est associé au mouvement vers l'avant en fonction du déplacement de la tête du participant afin de recréer au maximum le déplacement réel de la personne dans l'EV. La vitesse de déplacement s'adapte à l'allure des cycles de marche. Le déplacement dans l'EV s'effectue en ligne droite pour ne pas engendrer de conflits sensoriels. De plus, une bande sonore correspondant au paysage a été ajoutée pour augmenter le sentiment d'immersion dans l'EV. Une fois la session terminée, un fichier au nom du patient est créé, contenant la durée de la séance, le nombre de pas et donc la distance parcourue (Annexe VI). Dans le cas où ce patient a déjà réalisé une session et donc a déjà un fichier, il n'y a pas de fichier créé, les infos de la nouvelle séance sont transposées sur le premier fichier.



Figure 12 : Environnement virtuel utilisé au sein du dispositif de rééducation

4. Analyse statistique

Le degré de signification statistique retenu pour l'ensemble des analyses a été fixé à 0,05. Les statistiques ont été réalisées sur le logiciel Excel™ et son extension XLSTAT™.

4.1. Analyses descriptives

Un diagramme de flux des participants a été présenté.

Pour vérifier la normalité de la distribution de nos données, nous avons utilisé un test de Shapiro-Wilk. Les variables quantitatives suivant une loi normale (taille, poids, PQ) ont été décrites selon la moyenne \pm écart type. Les variables quantitatives ne suivant pas une loi normale (âge, MSSQ-Short, SSQ, SUS) ont été décrites selon la médiane et l'intervalle interquartile.

La variable qualitative (genre) a été décrite par les effectifs et pourcentages.

4.2. Analyse principale

Nous avons effectué une comparaison entre le score du SSQ 1.1 et SSQ 1.2, ainsi qu'entre le score du SSQ 2.1 et SSQ 2.2. Pour cela nous avons utilisé un test des rangs signés de Wilcoxon, les variables ne suivant pas une loi normale.

4.3. Analyses secondaires

Nous avons effectué une corrélation entre le score du MSSQ-Short et la valeur de Δ SSQ1. Les deux variables ne suivant pas une loi normale, nous avons réalisé un test de Spearman.

Nous avons effectué une comparaison entre Δ SSQ1 et Δ SSQ2. Pour cela nous avons utilisé un test des rangs signés de Wilcoxon, les variables ne suivant pas une loi normale.

Nous avons effectué une comparaison du score de PQ1 et du score de PQ2. Nous avons utilisé un test t de Student apparié, les variables suivant une loi normale.

Nous avons effectué une corrélation entre Δ SSQ1 et PQ1 ainsi qu'entre Δ SSQ2 et PQ2. Les variables PQ1 et PQ2 suivant une loi normale, nous avons réalisé un test de Pearson.

Résultats

1. Population

1.1. Diagramme de flux

Quarante participants ont été recrutés sur la base du volontariat, entre le personnel du service MPR du CHU de Limoges, les doctorants et masters d'HAVAE et les étudiants de l'ILFOMER (Figure 13). Parmi ces 40, 37 ont été inclus après la vérification des critères d'inclusion. Il n'y a pas eu de sortie d'étude.

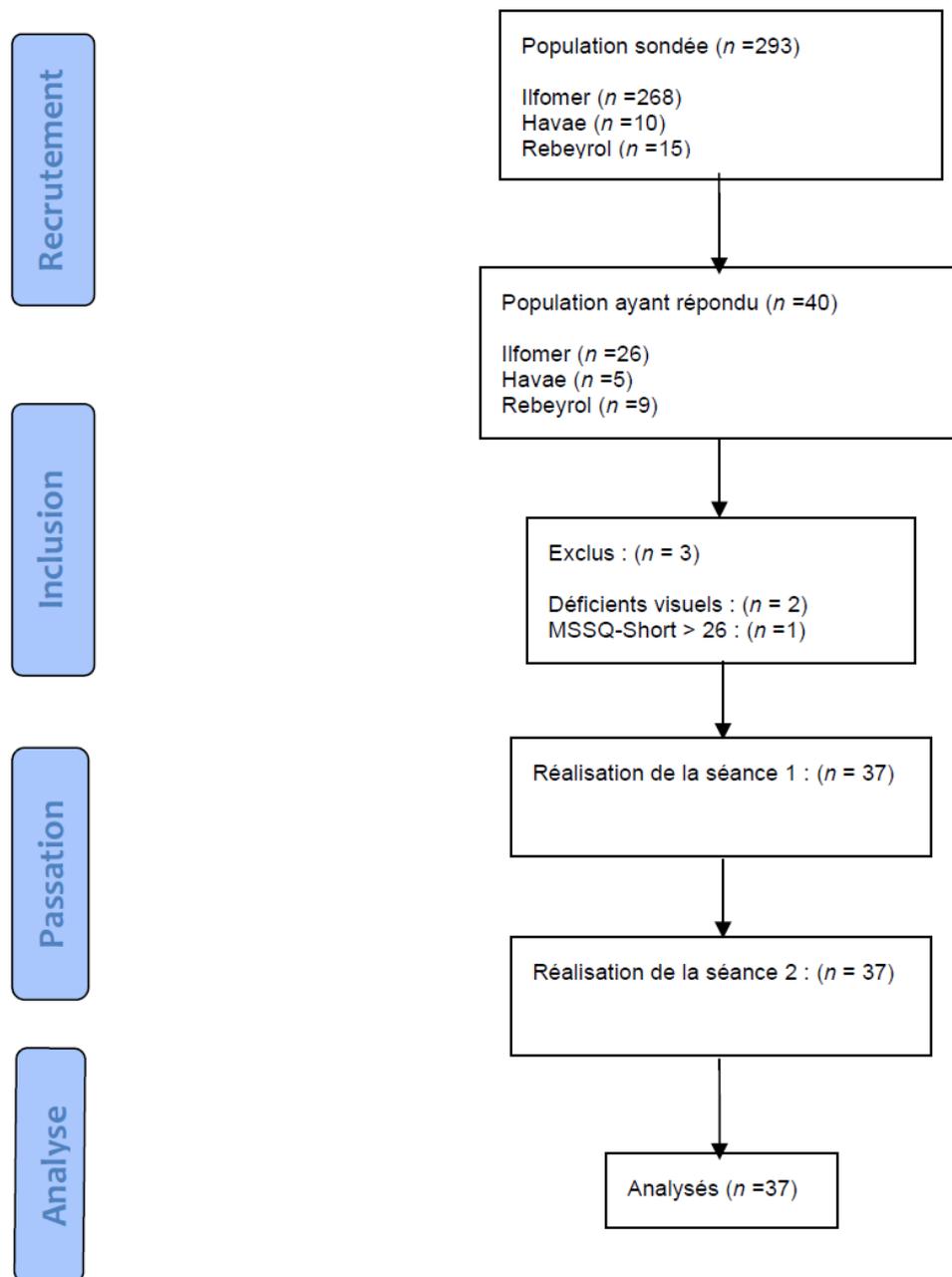


Figure 13 : Diagramme de flux adapté de la méthode CONSORT

1.2. Caractéristiques générales des participants

Trente-sept participants ont été inclus. Leurs caractéristiques anthropométriques sont présentées dans le Tableau 4. Le groupe possède un âge médian de 22 ans, avec une tranche d'âge allant de 19 ans à 53 ans. Le groupe est composé de 20 femmes et 17 hommes, soit 54% de femmes.

Tableau 4 : Caractéristiques générales des participants

Effectif inclus	37
Age (années) med [Q1 ; Q3]	22 [21 ; 24]
Ratio H	46%
Taille (cm) moy ± EC [min-max]	173.43 ± 8.99 [155-192]
Poids (kg) moy ± EC [min-max]	66.11 ± 12.69 [49-95]
MSSQ-Short (sur 54) med [Q1 ; Q3]	8 [2.41 ; 12.375]

Med : Médiane ; **Q1** : Premier quartile ; **Q3** : Troisième quartile ; **Moy** : Moyenne ; **EC** : écart-type ; **[min-max]** : extrêmes ; **H/F** : homme/femme ; **MSSQ-Short** : Motion Sickness Susceptibility Questionnaire Short

1.3. Contenu des séances

Chaque participant a réalisé les 20 minutes de marche sans pause et a effectué environ 700 pas. Le nombre de pas en 20 minutes à 2 km/h avec un demi-pas égal à 48 cm est théoriquement de 695. Sur l'affichage du GT, aucun participant n'a réalisé moins de 700 pas.

Le dispositif a présenté au cours des séances plusieurs bugs. Entre chaque séance, nous avons apporté des modifications afin de les résoudre. Un seul participant est venu et n'a pas pu réaliser sa séance ce jour-là à cause d'un problème technique, sa séance a été décalée.

2. Incidence et sévérité des effets indésirables

Lors de la première séance, 28 participants soit 75.7% n'ont eu aucun effet indésirable, avec un Δ SSQ1 négatif ou nul. Quatre participants soit 10.8 % ont eu un symptôme, côté à « un peu » au SSQ, et 5 participants soit 13.5% ont eu plus d'un symptôme lors de l'exposition à la RV.

Lors de la deuxième séance, 29 participants soit 78.4% n'ont eu aucun effet indésirable, avec un Δ SSQ2 négatif ou nul. Quatre participants soit 10.8 % ont eu un symptôme, côté à « un peu » au SSQ, et 4 participants soit 10.8% ont eu plus d'un symptôme lors de l'exposition à la RV.

Plusieurs personnes ont obtenu un Δ SSQ négatif, correspondant à une diminution du score post séance.

Il n'y a pas de différence significative ($p=0.203$) entre la moyenne du SSQ 1.1 et celle du SSQ 1.2, tandis que pour la séance 2, on observe un p inférieur à 0.05 ($p=0.032$). Il y a donc une différence significative entre la moyenne du SSQ 2.1 et du SSQ 2.2. (Figure 14)

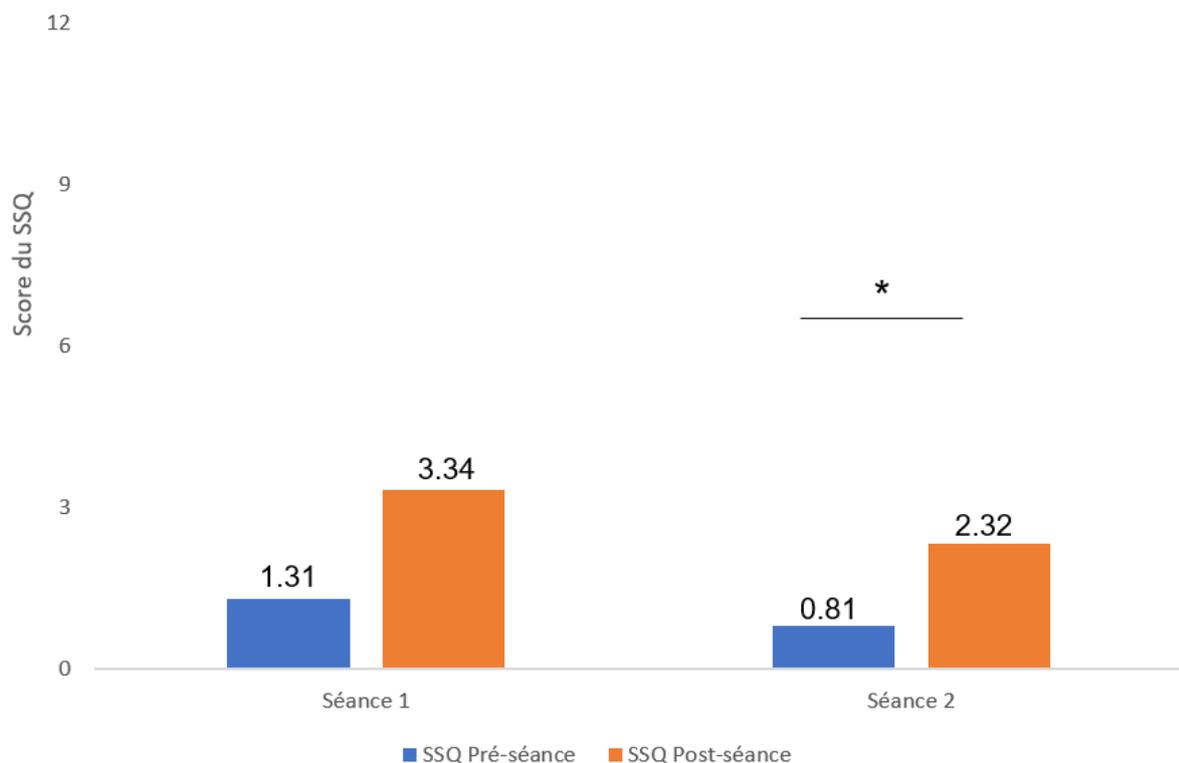


Figure 14 : Description du score pré et post séance du Simulator Sickness Questionnaire

* : différence significative ; **SSQ** : Simulator Sickness Questionnaire ; * : $p < 0.05$

3. Objectifs secondaires

3.1. Lien entre le Motion Sickness Susceptibility Questionnaire Short et l'apparition d'évènements indésirables

Le score médian du MSSQ-Short est de 8, l'intervalle interquartile est [2.41 ; 12.375]. Peu de personnes ont eu un score nul au MSSQ-Short.

Il n'y a pas de lien retrouvé entre la variable indépendante qui est le score du MSSQ-Short et la variable dépendante qui est le score du Δ SSQ 1. En effet, R est égal à 0.047 avec un p égal à 0.782.

3.2. Evolution de la tolérance au cours des séances

La deuxième séance a provoqué moins d'EI (78% sans EI pour 75% lors de la première séance) (Figure 15). Δ SSQ 2 ne comporte comme extrêmes qu'une personne dont le score est monté à 26.18, la seconde personne la plus haute étant à 7.48. Lors de la première séance, deux participants ont eu un Δ SSQ 1 égal à 26.18 et deux autres à 14.96. La différence n'est pas significative d'un point de vue statistique ($p=0.979$).

A noter que les variables Δ SSQ1 et Δ SSQ2 ont une médiane, un premier quartile ainsi qu'un troisième quartile égal à 0.

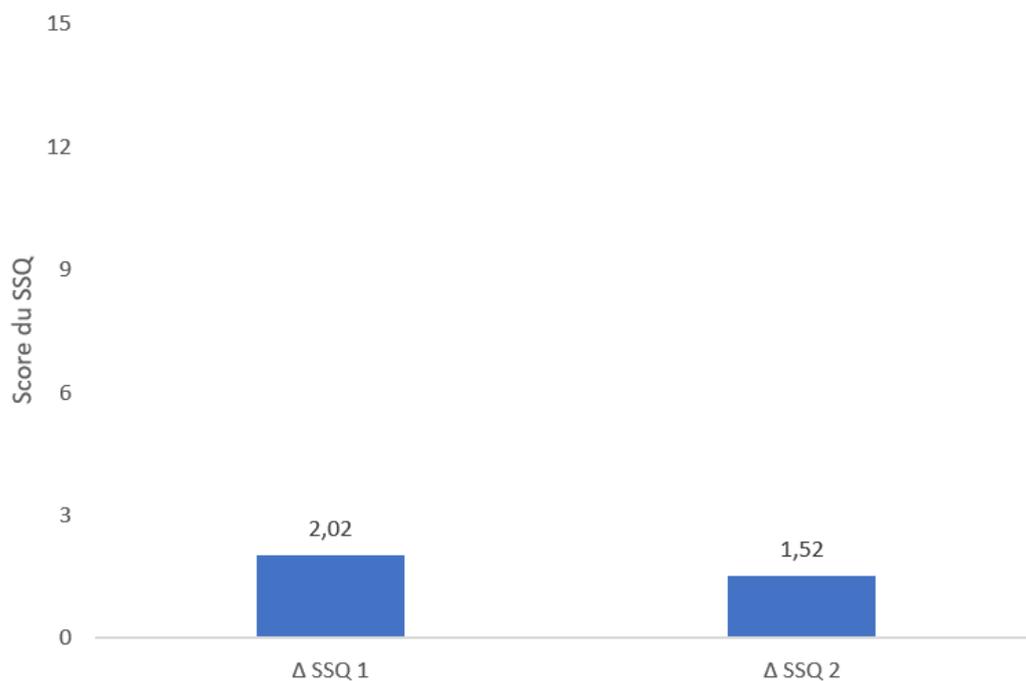


Figure 15 : Evolution du Δ SSQ au cours des séances

Δ SSQ : différence entre le score du Simulator Sickness Questionnaire pré et post séance

3.3. Sentiment de présence

Le SdP dans l'EV a été évalué par le PQ. Les participants ont un score moyen au PQ de $104.11 \pm 9,37$ après la première séance et $108.73 \pm 9,1$ après la seconde séance. Sur les 37 participants, 28 ont un score qui augmente entre la première et la seconde séance (Figure 16). Il y a une différence significative entre le score du PQ de la première séance et celle de la deuxième séance. ($p < 0.0001$).

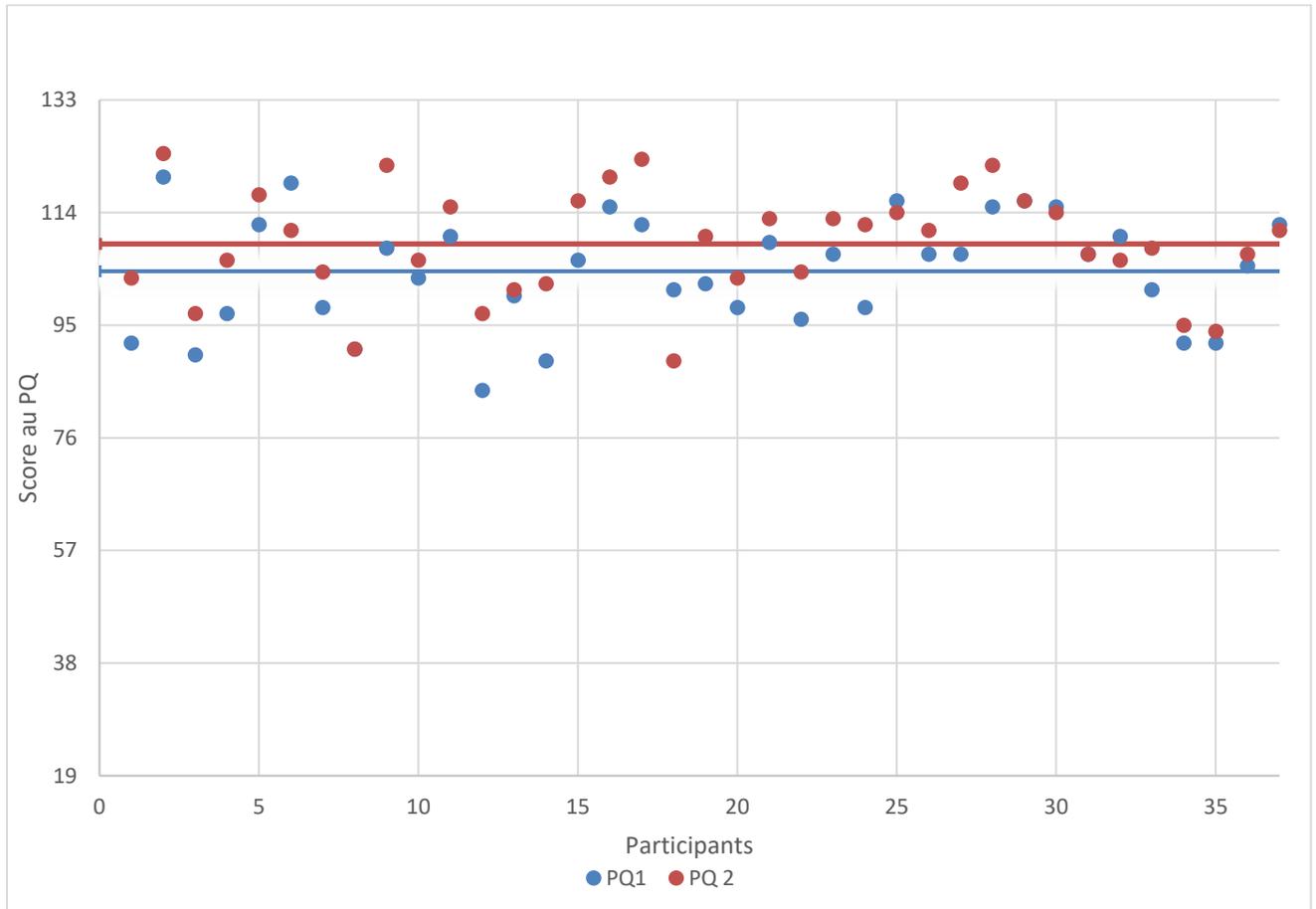


Figure 16 : Evolution du score du Presence Questionnaire entre les séances

PQ : Presence Questionnaire ——— : moyenne de PQ1 ——— : moyenne de PQ2

3.3.1. Lien entre le sentiment de présence et l'apparition d'évènements indésirables

La Figure 17 représente la courbe de tendance entre le SdP et l'apparition d'EI lors de la séance 1 et de la séance 2. Il existe un faible lien négatif pour la séance 1 avec un R égal à -0.279 et un $p = 0.094$. En revanche, pour la séance 2, R est égal à -0.413, avec $p = 0.011$.

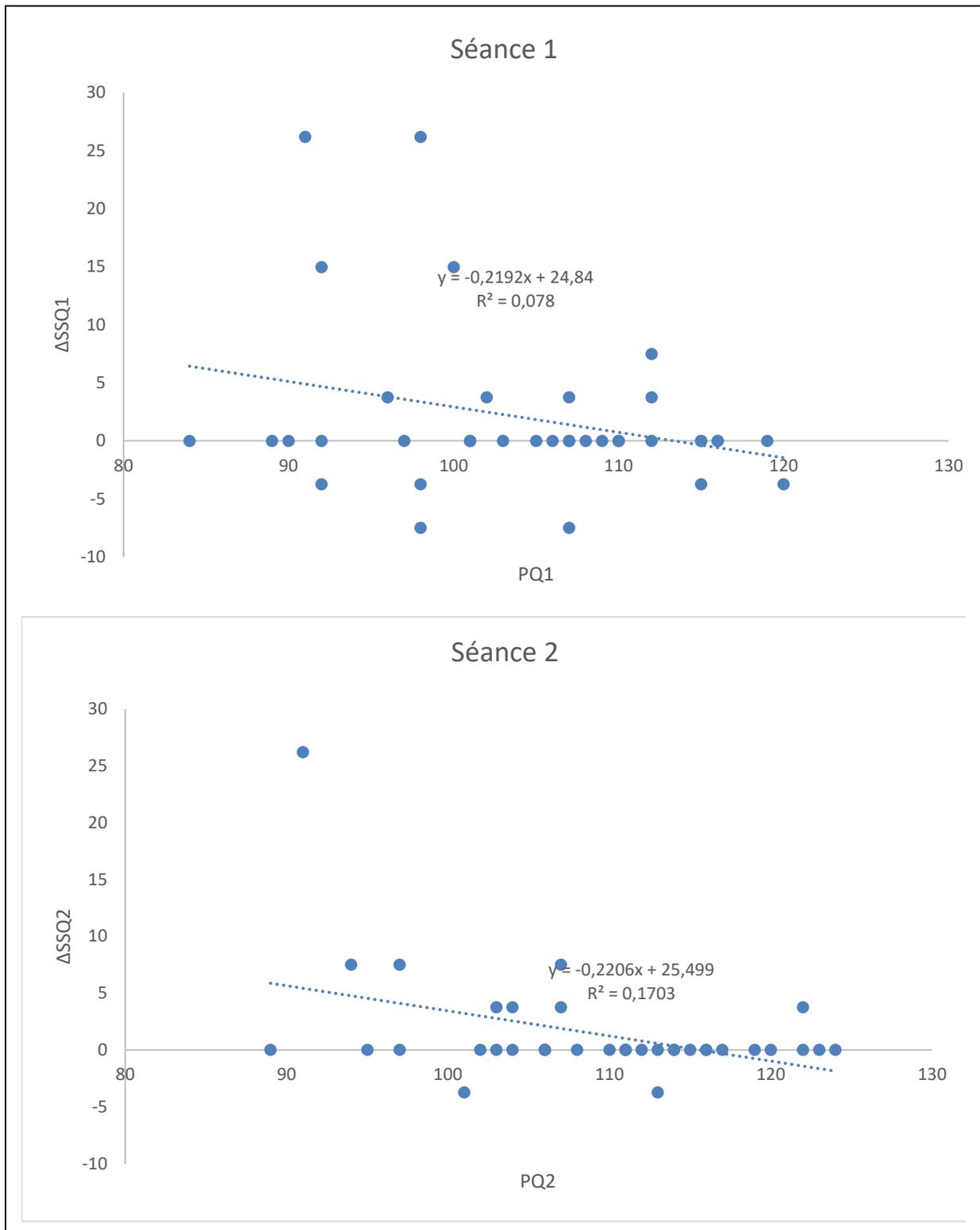


Figure 17 : Corrélation entre les scores du Simulator Sickness Questionnaire et du Presence Questionnaire

ΔSSQ : Différence entre le score du Simulator Sickness Questionnaire pré et post séance

PQ : Presence Questionnaire

3.4. Utilisabilité du système

La Figure 18 représente les différents scores obtenus au SUS à la fin des deux séances. La médiane est de 87.5. Le premier quartile et troisième quartile sont respectivement à 85 et 90.

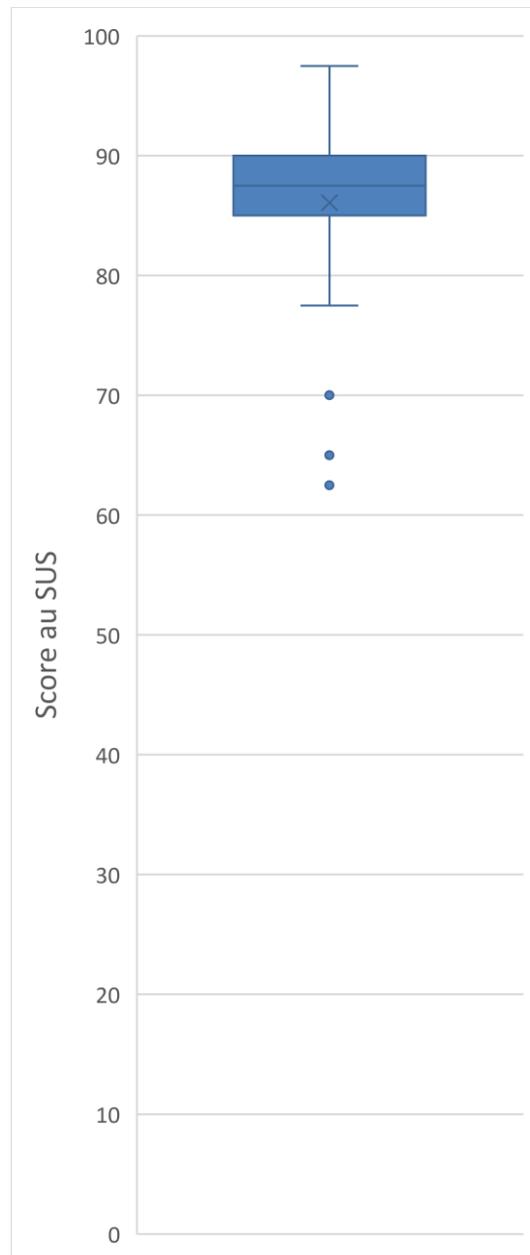


Figure 18 : Utilisabilité du dispositif par le System Usability System

Discussion

1. Objectif de l'étude

L'objectif principal de cette étude était d'étudier la tolérance du dispositif créé chez des sujets sains. Ce type de dispositif (RV immersive et assistance robotisée à la marche) n'a été que peu de fois décrit dans la littérature, et il contenait toujours des légères différences par rapport à notre dispositif, il était donc nécessaire d'en étudier la tolérance avant d'étudier son efficacité. Nous avons cherché à mettre en lien les facteurs de l'apparition d'EI, nous avons donc réalisé le PQ. Nous avons également recueilli les différents problèmes auxquels les participants ont pu être confrontés, afin de faire une observation du fonctionnement de l'outil pour l'améliorer dans la suite du projet.

2. Interprétation des résultats et comparaison avec la littérature

2.1. Incidence et sévérité des effets indésirables

Une très bonne tolérance a été observée chez cette population. Aucune séance n'a été arrêtée à cause d'EI. Plus de 85% des participants n'ont pas eu d'EI non négligeables ($SSQ < 5$) (86,5% pour la première séance et 89,2% pour la seconde). De plus, les rares cas de cybercinétose incluait des symptômes physiques qui disparaissaient une fois le casque de RV ôté.

Plusieurs personnes ont eu un ΔSSQ négatif (6 à la première séance et 2 à la deuxième séance). Cela indique qu'elles ont pu arriver en présentant divers symptômes (souvent mal de tête ou fatigue) et qu'à la suite de l'utilisation du dispositif, ces symptômes ont régressé. Nous pensons que cela peut s'expliquer par le détournement d'attention dû à l'EV. Kern et al. ont obtenu des résultats similaires avec un SSQ qui diminuait après la séance et ont supposé également que cela pouvait être dû à la distraction apportée par la RV (78).

L'analyse des EI a montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre le SSQ 1.1 et 1.2 ($p=0,203$). En revanche, lors de la seconde séance, la différence est significative ($p=0,032$), alors que cette séance a engendré moins d'EI. Il faut donc être critique quant à ce résultat qui malgré sa significativité possède un manque de pertinence clinique, puisque seulement 4 participants sur les 37 ont eu des EI non négligeables.

Nous avons émis l'hypothèse que ce dispositif serait bien toléré, en se basant sur les résultats des études associant la RV immersive à la marche chez des sujets sains (49,52,79). Cependant, nous ne nous attendions pas à obtenir d'aussi bons résultats. Malgré la distribution non normale, nous devons parler en termes de moyennes du ΔSSQ , puisque la médiane, le premier et le troisième quartile sont égaux à 0 pour les deux séances. Kim et al., De Keersmaecker et al. ainsi que Robillard et al. ont observé une bonne tolérance, mais avec des scores nettement plus élevés (Tableau 5).

Tableau 5 : Comparaison du score du SSQ selon les études

	Population	Age (moyenne \pm écart type) ou (médiane [Q1 ;Q3])	Score moyen au SSQ pré séance \pm écart- type	Score moyen au SSQ post- séance \pm écart-type
Kim et al. 2017 (49)	Jeunes adultes sains	28 \pm 7	-	8.3 \pm 10.5
	Adultes âgés sains	66 \pm 3	-	6.5 \pm 13.0
De Keersmaecker et al. 2020 (52)	Adultes sains dans un EV avec des stimuli élevés	61 \pm 6	7.75 \pm 7.40	9.08 \pm 7.29
	Adultes sains dans un EV avec peu de stimuli	62 \pm 5	6.95 \pm 6.86	10.7 \pm 12.26
Robillard et al. 2003 (79)	Adultes sains	33.9	-	16.7 \pm 17.0
Kern et al. 2019 (78)	Adultes sains	22.68 \pm 2.64	21.19 \pm 20.87	14.23 \pm 15.45
Winter et al. 2021 (54)	Adultes sains	-	-	17.04 \pm 18.46
Résultats principaux de notre étude	Personnes saines majeures séance 1	22 [21 ; 24]	1.31 \pm 2.53	3.34 \pm 6.98
	Personnes saines majeures séance 2	22 [21 ; 24]	0.81 \pm 2.00	2.32 \pm 5.5

SSQ : Simulator Sickness Questionnaire ; **EV** : environnement virtuel ; **Q1** : premier quartile ;
Q3 : troisième quartile

Ces résultats obtenus peuvent être dus à la population, qui est globalement jeune et régulièrement sensibilisée à la RV en rééducation dans le cadre de leur formation. De plus l'outil développé crée un mouvement physique qui est retransmis dans le casque. Le type de déplacement dans l'EV et dans la réalité sont donc similaires, or c'est ce type de déplacement qui entraîne le moins de cybercinétose (41).

L'examineur étant en dernière année, il faisait passer principalement des gens de sa promotion, ou des gens de promotions inférieures. En conséquence, les résultats des questionnaires sont probablement limités par un biais de désirabilité.

2.2. Lien entre le Motion Sickness Susceptibility Questionnaire-Short et l'apparition d'évènements indésirables

Pour la suite du projet, nous voulions observer si un score élevé au MSSQ-short était prédictif d'une mauvaise tolérance. Nous n'avons pas un lien significatif entre ces deux variables sur notre étude ($R=0.047$ avec $p=0.782$). Cependant, nous pouvons observer que les 4 personnes ayant eu le plus de symptômes après la première séance ont un score au MSSQ-short plus élevé que la moitié des participants. Une étude récente, réalisée sur 154 participants, a pu observer, au-delà de certaines exceptions, un lien fort entre ces deux variables (80). La population a été séparée en 3 selon le score du MSSQ-Short, un premier groupe contenait le tiers de la population avec les plus hauts scores, un deuxième groupe contenait le tiers de la population avec le plus faible score et le troisième groupe était composé de personnes avec un score médian. Le groupe possédant les scores les plus élevés est celui qui a eu de manière significative le plus de symptômes de cybercinétose (80).

Ainsi, nous devons être d'autant plus vigilants auprès des participants possédant un score élevé au MSSQ-short.

2.3. Recherche d'une habitude

Nous avons comparé $\Delta SSQ1$ et $\Delta SSQ2$ qui sont le reflet de l'apparition d'EI de la séance 1 et 2, afin de regarder s'il y a eu un phénomène d'habitude. Malgré l'absence de différence significative entre la séance 1 et 2, nous pouvons observer moins d'extrêmes lors de la seconde séance, un seul au-dessus de 10 pour 4 à la première séance.

Ces résultats sont liés au fait qu'il y a eu presque autant de participants qui ont baissé leur score à la seconde séance (7/37) que de participants qui l'ont augmenté (5/37). De plus, l'écart entre les séances n'était pas le même pour tous les participants. Pour des raisons logistiques, certains ont eu leurs séances espacées de 24h et d'autres de 216h.

Ce phénomène d'habituation est décrit dans littérature, Howart et al. l'ont étudié en comparant 7 groupes de 10 personnes. Le premier groupe avait chaque séance espacée d'un jour, le second groupe de deux jours et ainsi de suite jusqu'au 7^e groupe avec des séances espacées de 7 jours. Chaque groupe réalisait 10 séances. Ils ont conclu en disant que le nombre d'expositions était un facteur plus important que l'espacement des séances quant à l'apparition d'EI (68).

2.4. Sentiment de présence

Le SdP a été évalué par le PQ version 3.0. Ce questionnaire est modulable selon la présence d'audio ou de toucher dans l'EV. En conséquent, il contient un nombre différent d'items selon les études qui l'utilisent. Robillard et al. ont traduit et validé la version française du PQ puis l'ont utilisé pour une de leurs études comparant l'anxiété et le SdP (75,79). Ils obtiennent eux aussi un score moyen élevé, de 102.7 ± 9.7 pour leur groupe d'adultes présentant une phobie et un score moyen de 93.7 ± 11.2 pour leur groupe contrôle, composé d'adultes sains.

Le score moyen du PQ lors de notre première séance est de 104.11 ± 9.37 . Les participants se sentaient tous présents dans l'EV. Une grande partie d'entre eux a essayé d'éviter des feuilles sur leur passage ou d'enjamber un trottoir fictif, signe d'un SdP important.

Entre les deux séances, le SdP a augmenté de manière significative ($p < 0.0001$). Même si la moyenne n'a augmenté que de 4,6 points (108.73 ± 9.1 à la seconde séance), 28 participants ont un score qui augmente.

A la fin de la seconde séance, plus de la moitié des participants (26 sur 37) ont trouvé la séance plus rapide. Afin d'objectiver ce ressenti, nous pourrions ne pas annoncer le temps passé dans l'EV et leur demander sous forme d'échelle visuelle analogique une estimation du temps passé. Cette sensation de séance plus rapide est probablement due au SdP plus élevé, 10 participants ont trouvé qu'il était plus facile d'explorer et d'être présent en connaissant l'EV. Une autre explication serait que d'une session à l'autre, l'EV était modifié afin d'éliminer les problèmes techniques ayant pu survenir.

2.5. Lien entre le sentiment de présence et les évènements indésirables

La relation entre le SdP et l'apparition d'EI est connu dans la littérature, Weech et al. ont sorti une revue de la littérature dans laquelle ils concluent d'un lien négatif entre le SdP et l'apparition d'EI. Plus le SdP est élevé et moins nombreux sont les EI (66). Mais ce n'est pas si simple, puisque ces deux derniers sont eux-mêmes dépendants d'une multitude de facteurs plus ou moins bien établis. La Figure 19 récapitule les différents liens entre tous ces facteurs.

Nous retrouvons ce lien dans notre étude. Lors de la première séance, le lien existe, avec un coefficient de corrélation égal à -0.279 mais il n'est pas significatif ($p = 0,098$). En revanche,

lors de la seconde séance, grâce à l'augmentation significative énoncée ci-dessus du SdP, et une légère diminution de l'apparition d'EI, ce lien est renforcé avec un $R = -0.413$ et un $p = 0,011$.

Nous ne savons toujours pas si le SdP inhibe la perception des cybermalaises comme il peut le faire avec la douleur ou si le fait d'être présent réduit le conflit sensoriel et donc l'apparition d'EI.

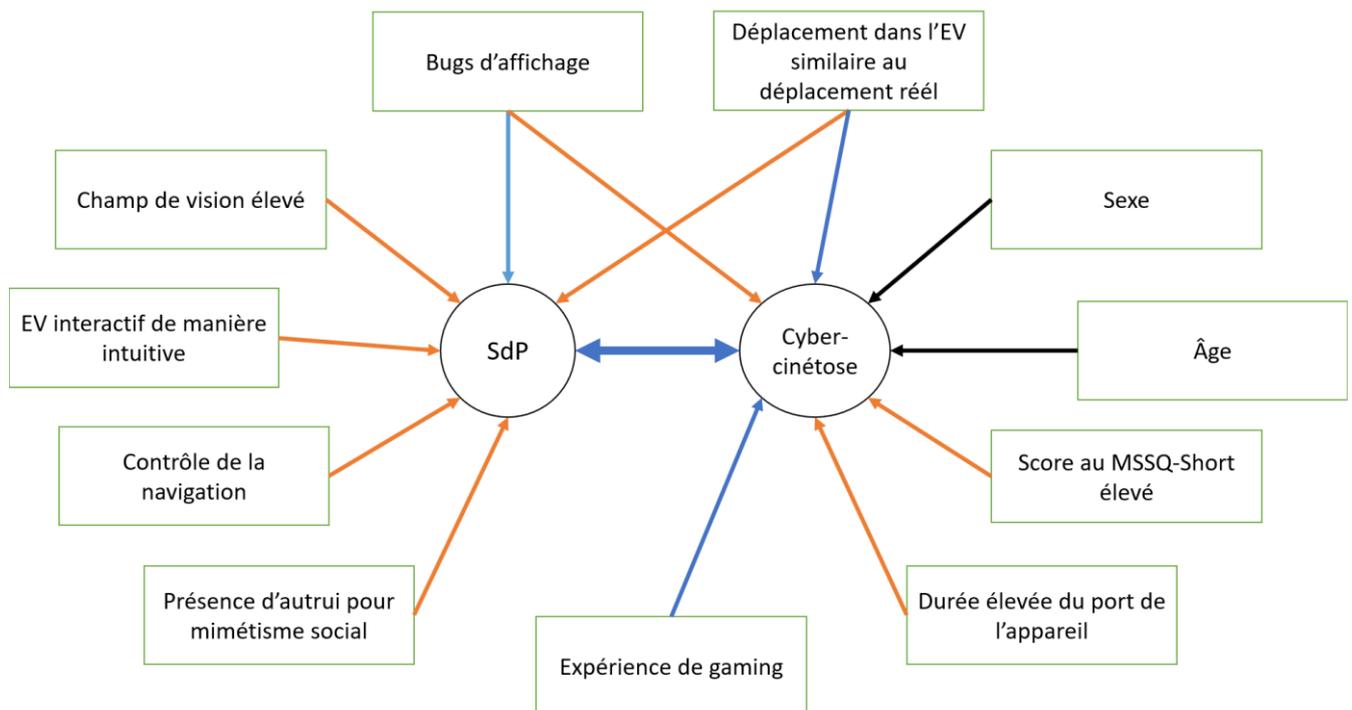


Figure 19 : Facteurs influençant le sentiment de présence et l'apparition d'effets indésirables

—> : diminue ; —> : augmente ; —> : influence ; **EV** : environnement virtuel ; **SdP** : sentiment de présence ; **MSSQ-Short** : Motion Sickness Susceptibility Questionnaire version courte

2.6. Utilisabilité du système

L'utilisabilité du système a été évaluée par le SUS, le score médian était de 87.5 et l'intervalle interquartile allait de 85 à 90. Bangor et al. ont dans leur article ont réalisé une analogie entre le score final du SUS et l'adjectif associé (81) (Figure 20). Si l'on compare à l'échelle du SUS, le dispositif peut être qualifié d'excellent.

Winter et al. dans leur étude associant la RV immersive et la marche sur tapis roulant ont obtenu dans le groupe de personnes saines un score moyen de 83.75 ± 10.03 (54).

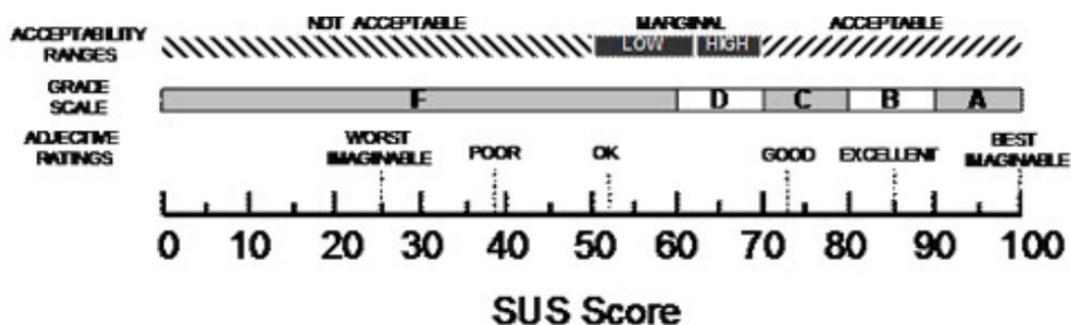


Figure 20 : Signification du score SUS (81)

Cependant, l'utilisabilité était orientée pour une utilisation future en tant qu'utilisateur et non en tant que professionnel de santé. Il aurait été intéressant d'avoir l'utilisabilité du dispositif du point de vue de l'expérimentateur.

3. Généralisation

L'âge est un facteur lié à l'apparition d'EI (41). La population a été recrutée principalement à l'ILFOMER. C'est pourquoi la population étudiée est très jeune, 75% des participants sont en dessous de 24 ans. Nous avons tout de même réussi à inclure deux participants avec un âge supérieur à 50 ans.

Nous aurions dû demander si les participants avaient déjà eu une expérience de RV car l'expérience de gaming et de RV influence également l'apparition d'EI (41). Cependant, nous pouvons supposer que c'est le cas pour une majorité de la population, les étudiants de l'ILFOMER et les doctorants d'HAVAIE étant régulièrement sensibilisée à l'apport de la RV en rééducation dans le cadre de leur formation.

Les participants ont une taille et un poids répartis de façon homogène, le ratio homme/femme est également équivalent à la population française.

Les deux premiers points abordés ne nous permettent pas de généraliser nos résultats à la population française.

4. Limites et perspectives

Durant 3 semaines, nous avons dû dégager des créneaux pendant lesquels la salle de kinésithérapie où était stocké le GT était inoccupé. Nous recevions donc des participants de 12h15 à 13h45 et de 16h à 19h. Tous les créneaux ont été occupés, soit au total 33h30 de passations, sans compter les heures d'installations et de rangement du matériel informatique. Nous avons rempli l'ensemble des créneaux disponibles et avons donc exploité la totalité des capacités de recrutement pour cette étude.

La salle dans laquelle était le GT était un lieu de passage, et le bruit des portes et des discussions avait tendance à sortir les participants de l'EV. Pour faciliter les passations et

projets futurs et pour ne pas gêner le déroulement du protocole, une salle dédiée à ce dispositif devrait être mise à disposition.

A la fin de chaque séance, nous avons recueilli les remarques des participants et avons pu relever les principaux points positifs et négatifs du dispositif. Nous allons séparer les limites du dispositif en deux, avec d'un côté les limites du GT et de l'autre les limites de la RV, avec les solutions à apporter pour améliorer le tout.

4.1. Gait Trainer et assistance robotisée à la marche

Le GT présent en MPR est relativement ancien (installé en 2007). Le moteur du GT fait beaucoup de bruit, il faudrait poser un casque insonorisant sur les participants. De plus, certains participants ont noté que son cycle de marche faisait plus penser à un glissement (notion de ski de fond évoquée) qu'à de la marche. Le pied droit va également plus vite et plus loin.

Il existe une nouvelle version du GT, mais également de nouvelles assistances à la marche robotisée comme le Lokomat, s'adaptant à la participation active du patient, avec un meilleur schéma de marche.

4.2. Réalité virtuelle

Il a plusieurs fois été reproché à l'EV, un manque d'attractivité, de vie de lien social. Nous arrivons donc à la limite de la technologie, puisque l'ordinateur faisant tourner le logiciel ne supportait pas le mouvement dans l'EV. Le simple mouvement des feuilles provoquait un flou au loin dû au manque de puissance du casque et de l'ordinateur.

Beaucoup de participants ont trouvé gênant la sensation d'aller plus vite dans la vie que dans l'EV, malgré une longueur de demi-pas identique sur le GT à l'EV (48 cm).

L'apport d'un graphiste pourrait être intéressante pour l'amélioration de l'EV, avec la création de plusieurs autres EV à long terme. Un changement de matériel avec un ordinateur plus puissant, ainsi qu'un casque de RV avec une meilleure définition et sans fil sont également à envisager. Le dernier HTC Vive Pro répond à ces critères.

Ces différentes remarques nous permettent d'améliorer la technologie avant la suite du projet.

4.3. Suite du projet

Le but de cette étude est la création d'un outil technologique validé scientifiquement. C'est la première étape du projet RAVIS. Ce dispositif est mobile, et tous les centres ayant un appareil robotisé à la marche pourraient en bénéficier. La RV est pour le moment associée au GT, mais le tracker étant sur le pied, nous pourrions envisager de passer sur un tapis roulant. Ainsi, même en milieu ou fin de rééducation, ce dispositif pourrait être utile au patient.

Dans un premier temps, ce travail va être valorisé afin de réaliser un article technologique, présentant le dispositif et le programme informatique réalisé par les étudiants de l'ENSIL.

Afin de le valider, une étude de tolérance chez le patient AVC non marchant sera menée. Elle a été validée par l'organisme méthodologique de l'hôpital, le Conseil Scientifique et Méthodologique, puis va être présentée au Comité de Protection des Personnes. Nous allons présenter ci-dessous, les principales différences entre l'étude à venir et celle-ci.

La tolérance de séances de rééducation à la marche robot-assistée par GT avec et sans ajout de RV immersive sera observée. Les patients post-AVC réaliseront 3 séances conventionnelles (GT seul) et 3 séances équipés du dispositif de RV.

Les critères d'inclusion et d'exclusion sont présentés dans le Tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6 : Critères d'inclusion et de non-inclusion du projet RAVIS

Critères d'inclusion	Critères de non-inclusion
<p>Hémi-parésie à la suite d'un premier AVC ischémique ou hémorragique ; En phase subaiguë (15j-6 mois) ; Âgés entre 35 et 75 ans ; Sujet non marchant (impossibilité de réaliser 3 fois 10 mètres sans aide humaine ou Functional Ambulation Classification ≤ 2) ; Patient bénéficiant d'une rééducation à la marche robot-assistée au sein du service de MPR du CHU de Limoges ; Ayant les capacités cognitives pour comprendre et suivre des instructions verbales simples (MMSE > 24 ou BDAE > 2) ; Être capable de donner son consentement éclairé à participer à l'étude</p>	<p>Avoir des maladies neurologiques et psychiatriques, autre qu'un AVC ; Pathologies contre indiquant l'utilisation de la RV (troubles épileptiques, syndrome cérébelleux majeur, migraine avec aura) ; Incapacité à évoluer dans un EV définie par un MSSQ-Short > 26 ; Patient présentant des troubles aigus cardiovasculaires et respiratoires non stabilisés ; Patient faisant l'objet d'une mesure de protection légale ou hors d'état d'exprimer son consentement ; Personne privée de liberté Expérience en RV les 5 années précédant l'AVC</p>

Le dispositif sera considéré comme bien toléré s'il y a moins de 20% de patients ayant un score au SSQ > 20.

L'évaluation de la survenue de symptômes physiques à la suite de l'utilisation de ce dispositif permettra d'envisager par la suite une évaluation de son efficacité sur un design d'étude type RCT en simple aveugle. L'objectif final sera de proposer cette nouvelle prise en soins courants lors de la prise en charge des patients AVC non-marchants.

Conclusion

Nous voulions étudier la tolérance de l'association de la RV immersive et de l'assistance robotisée à la marche sur des sujets sains. Nous avons relevé également le SdP et l'utilisabilité de chaque participant. Nous avons validé le fonctionnement du dispositif de rééducation en relevant les problèmes techniques et en les résolvant.

Il n'y a pas eu de différence significative entre le SSQ pré-séance 1 et le SSQ post-séance 1. En revanche, une différence significative a été relevée entre le SSQ pré-séance 2 et le SSQ post-séance 2.

Nous pouvons affirmer que la tolérance chez notre population a été meilleure qu'attendue, au vu de la littérature existante. Ces résultats seraient dus au dispositif qui ne créait pas de conflit sensoriel, en étant en accord entre le déplacement dans l'EV et dans la réalité ; mais probablement aussi grâce à une population jeune et habituée à l'usage de la RV.

Le SdP était assez élevé et augmentait d'une séance à l'autre. L'utilisabilité du dispositif a été évaluée comme excellente par les participants.

Les limites du dispositif notamment technologiques ayant été identifiées, les perspectives de ce travail sont nombreuses avec l'étude de tolérance du dispositif sur des patients ayant présenté un AVC, pour aboutir à l'étude de l'efficacité du dispositif dans la rééducation à la marche de patients ayant présenté un AVC. Les possibilités sont également nombreuses pour améliorer sur un plan technique l'outil.

Ce travail va faire l'objet d'une valorisation scientifique sous forme d'article technologique et d'une présentation à un congrès international.

Références bibliographiques

1. HAS. Accident vasculaire cérébral : méthodes de rééducation de la fonction motrice chez l'adulte. 2012.
2. Schnitzler and al. Impact de la rééducation à la phase subaiguë d'un accident vasculaire cérébral en France en 2016. 2016;
3. INSERM. Dossier d'information sur l'AVC. 2019.
4. Lecoffre C, de Peretti C, Gabet A, Grimaud O, Woimant F,, Giroud M, et al. L'accident vasculaire cérébral en France : patients hospitalisés pour AVC en 2014 et évolutions 2008- 2014. 2017;Bull Epidemiol Hebd.
5. Maier B, Boursin P, Mazighi M. Phase aiguë des accidents vasculaires cérébraux, chaque minute compte. Soins. sept 2018;63(828):28-31.
6. Cosnard G. Grandin C. Duprez T. Imageries de diffusion et de perfusion. In: Neuro-imagerie diagnostique. 2018.
7. Guzik A, Bushnell C. Stroke Epidemiology and Risk Factor Management: CONTINUUM: Lifelong Learning in Neurology. févr 2017;23(1):15-39.
8. Janot K, Charbonnier G, Boustia F, Lima Maldonado I, Bibi R, Pucheu J, et al. Prévention de l'AVC ischémique. La Presse Médicale. juin 2019;48(6):655-63.
9. Boursin P., Paternotte S., Dercy B., Sabben C., Maier B. Sémantique, épidémiologie et sémiologie des accidents vasculaires cérébraux. 2018;
10. de Morand A. Pratique de la rééducation neurologique. Elsevier Masson. 2010.
11. Royal College of Physicians, Intercollegiate Stroke, Working Party. National clinical guideline for stroke. Fifth edition. 2016.
12. Pollock A, Baer G, Campbell P, Choo PL, Forster A, Morris J, et al. Physical rehabilitation approaches for the recovery of function and mobility following stroke. Cochrane Stroke Group, éditeur. Cochrane Database of Systematic Reviews. 22 avr 2014;
13. Lord SE, McPherson K, McNaughton HK, Rochester L, Weatherall M. Community ambulation after stroke: how important and obtainable is it and what measures appear predictive? Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. févr 2004;85(2):234-9.
14. Viel E. La marche humaine, la course et le saut. Masson. 1999.
15. Bouisset S., Maton B. Muscles, posture et mouvement. 1995.
16. Gage J.R. Gait analysis in cerebral palsy. 1991.
17. Dujardin F, Tobenas-Dujardin AC, Weber J. Anatomie et physiologie de la marche, de la position assise et debout. EMC - Appareil locomoteur. janv 2009;4(2):1-18.
18. Dujardin F, Roussignol X, Mejjad O, Weber J, Thomine JM. Interindividual variations of the hip motion in normal gait. 1997;

19. Takakusaki K. Neurophysiology of gait: From the spinal cord to the frontal lobe: Neurophysiology of Gait. *Mov Disord.* 15 sept 2013;28(11):1483-91.
20. Takakusaki K. Functional Neuroanatomy for Posture and Gait Control. *J Mov Disord.* janv 2017;10(1):1-17.
21. MacKinnon CD. Sensorimotor anatomy of gait, balance, and falls. In: *Handbook of Clinical Neurology.* Elsevier; 2018. p. 3-26.
22. Inman VT, Ralston HJ, Todd F. "Human Walking". 1981.
23. Winters TF, Gage JR, Hicks R. Gait patterns in spastic hemiplegia in children and young adults. *J Bone Joint Surg Am.* mars 1987;69(3):437-41.
24. Beyaert C, Vasa R, Frykberg GE. Gait post-stroke: Pathophysiology and rehabilitation strategies. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology.* nov 2015;45(4-5):335-55.
25. Bower K, Thilarajah S, Pua YH, Williams G, Tan D, Mentiplay B, et al. Dynamic balance and instrumented gait variables are independent predictors of falls following stroke. *J Neuroeng Rehabil.* 7 janv 2019;16(1):3.
26. Holden MK, Gill KM, Magliozzi MR, Nathan J, Piehl-Baker L. Clinical Gait Assessment in the Neurologically Impaired. *Physical Therapy.* 1 janv 1984;64(1):35-40.
27. Brun V, Mousbeh Z, Jouet-Pastre B, Benaim C, Kunnert JE, Dhoms G, et al. Évaluation clinique de la marche de l'hémiplégique vasculaire : proposition d'une modification de la functional ambulation classification. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique.* janv 2000;43(1):14-20.
28. Belda-Lois JM, Mena-del Horno S, Bermejo-Bosch I, Moreno JC, Pons JL, Farina D, et al. Rehabilitation of gait after stroke: a review towards a top-down approach. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation.* 13 déc 2011;8(1):66.
29. An M, Shaughnessy M. The effects of exercise-based rehabilitation on balance and gait for stroke patients: a systematic review. *J Neurosci Nurs.* déc 2011;43(6):298-307.
30. French B, Thomas LH, Coupe J, McMahon NE, Connell L, Harrison J, et al. Repetitive task training for improving functional ability after stroke. *Cochrane Stroke Group, éditeur. Cochrane Database of Systematic Reviews.* 14 nov 2016;
31. Veerbeek JM, van Wegen E, van Peppen R, van der Wees PJ, Hendriks E, Rietberg M, et al. What Is the Evidence for Physical Therapy Poststroke? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Quinn TJ, éditeur. PLoS ONE.* 4 févr 2014;9(2):e87987.
32. States RA, Pappas E, Salem Y. Overground physical therapy gait training for chronic stroke patients with mobility deficits. *Cochrane Stroke Group, éditeur. Cochrane Database of Systematic Reviews.* 8 juill 2009;
33. Mehrholz J, Elsner B, Pohl M. Treadmill Training for Improving Walking Function After Stroke. *Stroke.* 1 mai 2014;45(5):e76-7.
34. Mehrholz J, Thomas S, Werner C, Kugler J, Pohl M, Elsner B. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. *Cochrane Stroke Group, éditeur. Cochrane Database of Systematic Reviews.* 10 mai 2017;

35. Tedla JS, Dixit S, Gular K, Abohashrh M. Robotic-Assisted Gait Training Effect on Function and Gait Speed in Subacute and Chronic Stroke Population: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Eur Neurol.* 2019;81(3-4):103-11.
36. Freivogel S, Schmalohr D, Mehrholz J. Improved walking ability and reduced therapeutic stress with an electromechanical gait device. *J Rehabil Med.* 2009;41(9):734-9.
37. Morel M, Bideau B, Lardy J, Kulpa R. Advantages and limitations of virtual reality for balance assessment and rehabilitation. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology.* nov 2015;45(4-5):315-26.
38. Huygelier H, Mattheus E, Abeele VV, van Ee R, Gillebert CR. The Use of the Term Virtual Reality in Post-Stroke Rehabilitation: A Scoping Review and Commentary. *Psychol Belg.* 2021;61(1):145-62.
39. Laver KE, Lange B, George S, Deutsch JE, Saposnik G, Crotty M. Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Stroke Group, éditeur. Cochrane Database of Systematic Reviews.* 20 nov 2017;
40. Pot-Kolder R, Veling W, Counotte J, van der Gaag M. Anxiety Partially Mediates Cybersickness Symptoms in Immersive Virtual Reality Environments. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking.* mars 2018;21(3):187-93.
41. Saredakis D, Szpak A, Birckhead B, Keage HAD, Rizzo A, Loetscher T. Factors Associated With Virtual Reality Sickness in Head-Mounted Displays: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Front Hum Neurosci.* 31 mars 2020;14:96.
42. Liu W, Zeng N, Pope ZC, McDonough DJ, Gao Z. Acute Effects of Immersive Virtual Reality Exercise on Young Adults' Situational Motivation. *JCM.* 12 nov 2019;8(11):1947.
43. Fung V, Ho A, Shaffer J, Chung E, Gomez M. Use of Nintendo Wii Fit™ in the rehabilitation of outpatients following total knee replacement: a preliminary randomised controlled trial. *Physiotherapy.* sept 2012;98(3):183-8.
44. de Rooij IJM, van de Port IGL, Visser-Meily JMA, Meijer JWG. Virtual reality gait training versus non-virtual reality gait training for improving participation in subacute stroke survivors: study protocol of the ViRTAS randomized controlled trial. *Trials.* déc 2019;20(1):89.
45. Zhang B, Li D, Liu Y, Wang J, Xiao Q. Virtual reality for limb motor function, balance, gait, cognition and daily function of stroke patients: A systematic review and meta-analysis. *J Adv Nurs.* août 2021;77(8):3255-73.
46. Knobel SEJ, Kaufmann BC, Gerber SM, Cazzoli D, Müri RM, Nyffeler T, et al. Immersive 3D Virtual Reality Cancellation Task for Visual Neglect Assessment: A Pilot Study. *Front Hum Neurosci.* 25 mai 2020;14:180.
47. Lee SH, Jung H, Yun SJ, Oh B, Seo HG. Upper Extremity Rehabilitation Using Fully Immersive Virtual Reality Games With a Head Mount Display: A Feasibility Study. *PM&R.* mars 2020;12(3):257-62.

48. Weber LM, Nilsen DM, Gillen G, Yoon J, Stein J. Immersive Virtual Reality Mirror Therapy for Upper Limb Recovery After Stroke: A Pilot Study. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*. sept 2019;98(9):783-8.
49. Kim A, Darakjian N, Finley JM. Walking in fully immersive virtual environments: an evaluation of potential adverse effects in older adults and individuals with Parkinson's disease. *J NeuroEngineering Rehabil*. déc 2017;14(1):16.
50. Zimmerli L, Jacky M, Lünenburger L, Riener R, Bolliger M. Increasing Patient Engagement During Virtual Reality-Based Motor Rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. sept 2013;94(9):1737-46.
51. Clark WE, Sivan M, O'Connor RJ. Evaluating the use of robotic and virtual reality rehabilitation technologies to improve function in stroke survivors: A narrative review. *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*. janv 2019;6:205566831986355.
52. De Keersmaecker E, Lefeber N, Serrien B, Jansen B, Rodriguez-Guerrero C, Niazi N, et al. The Effect of Optic Flow Speed on Active Participation During Robot-Assisted Treadmill Walking in Healthy Adults. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. janv 2020;28(1):221-7.
53. Bergmann J, Krewer C, Bauer P, Koenig A, Riener R, Müller F. Virtual reality to augment robot-assisted gait training in non-ambulatory patients with a subacute stroke: a pilot randomized controlled trial. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2018;
54. Winter C, Kern F, Gall D, Latoschik ME, Pauli P, Käthner I. Immersive virtual reality during gait rehabilitation increases walking speed and motivation: a usability evaluation with healthy participants and patients with multiple sclerosis and stroke. *J NeuroEngineering Rehabil*. déc 2021;18(1):68.
55. Kennedy RS, Lane NE, Berbaum KS, Lilienthal MG. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*. juill 1993;3(3):203-20.
56. Golding JF. Motion sickness. In: *Handbook of Clinical Neurology*. Elsevier; 2016. p. 371-90.
57. Oman C. M. *Motion Sickness : a synthesis and evaluation of the sensory conflict theory*. 1988;
58. Reason, J. T., Brand J. J. *Motion Sickness*. 1975;
59. Bles W, Bos JE, de Graaf B, Groen E, Wertheim AH. Motion sickness: only one provocative conflict? *Brain Research Bulletin*. nov 1998;47(5):481-7.
60. Gallagher M, Ferrè ER. Cybersickness: a Multisensory Integration Perspective. *Multisens Res*. 2018;31(7):645-74.
61. Treisman M. Motion Sickness: An Evolutionary Hypothesis. *Science*. 29 juill 1977;197(4302):493-5.
62. Riccio G. E., Stoffegren T. A. *An ecological theory of motion sickness and postural instability*. 1991;

63. Golding JF. Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Personality and Individual Differences*. juill 2006;41(2):237-48.
64. Munafo J, Diedrick M, Stoffregen TA. The virtual reality head-mounted display Oculus Rift induces motion sickness and is sexist in its effects. *Exp Brain Res*. mars 2017;235(3):889-901.
65. Clemes SA, Howarth PA. The Menstrual Cycle and Susceptibility to Virtual Simulation Sickness. *J Biol Rhythms*. févr 2005;20(1):71-82.
66. Weech S, Kenny S, Barnett-Cowan M. Presence and Cybersickness in Virtual Reality Are Negatively Related: A Review. *Front Psychol*. 4 févr 2019;10:158.
67. Slater M, Wilbur S. A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*. déc 1997;6(6):603-16.
68. Howarth PA, Hodder SG. Characteristics of habituation to motion in a virtual environment. *Displays*. mars 2008;29(2):117-23.
69. Kennedy RS, Stanney KM, Dunlap WP. Duration and Exposure to Virtual Environments: Sickness Curves During and Across Sessions. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*. oct 2000;9(5):463-72.
70. Golding JF. Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness. *Brain Research Bulletin*. nov 1998;47(5):507-16.
71. Kennedy RS, Drexler J, Kennedy RC. Research in visually induced motion sickness. *Applied Ergonomics*. juill 2010;41(4):494-503.
72. Kennedy RS, Stanney KM, Lanham DS. Configural Scoring of Simulator Sickness, Cybersickness and Space Adaptation Syndrome: Similarities and Differences? 2001;30.
73. Witmer BG, Singer MJ. Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence*. juin 1998;7(3):225-40.
74. Witmer BG, Jerome CJ, Singer MJ. The Factor Structure of the Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*. juin 2005;14(3):298-312.
75. Robillard, G., Bouchard, S., Renaud, P., & Cournoyer, L.G. Validation canadienne-française de deux mesures importantes en réalité virtuelle : l'Immersive Tendencies Questionnaire et le Presence Questionnaire. *Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO*; 2002.
76. Gronier G, Baudet A. Psychometric Evaluation of the F-SUS: Creation and Validation of the French Version of the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2 oct 2021;37(16):1571-82.
77. Brooke J. SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval Ind*. 30 nov 1995;189.
78. Kern F, Winter C, Gall D, Kathner I, Pauli P, Latoschik ME. Immersive Virtual Reality and Gamification Within Procedurally Generated Environments to Increase Motivation During Gait Rehabilitation. *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. mars 2019;500-9.

79. Robillard G, Bouchard S, Fournier T, Renaud P. Anxiety and Presence during VR Immersion: A Comparative Study of the Reactions of Phobic and Non-phobic Participants in Therapeutic Virtual Environments Derived from Computer Games. *CyberPsychology & Behavior*. oct 2003;6(5):467-76.
80. Oh H, Son W. Cybersickness and Its Severity Arising from Virtual Reality Content: A Comprehensive Study. *Sensors*. 9 févr 2022;22(4):1314.
81. Bangor, A., Kortum, P., & Miller, J. Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of Usability Studies*. 2009;114-23.

Annexes

Annexe I. Functional Ambulation Classification.....	65
Annexe I.I. Functional Ambulation Classification	65
Annexe I.II. Functional Ambulation Classification Modifiée	65
Annexe II. Motion Sickness Susceptibility Questionnaire Short Form.....	66
Annexe III. Simulator Sickness Questionnaire.....	67
Annexe IV. Presence questionnaire	68
Annexe V. System Usability Scale	71
Annexe VI. Exemple de fichier patient créé à la fin des séances.....	72

Annexe I. Functional Ambulation Classification

Annexe I.I. Functional Ambulation Classification

Classe 0 (non fonctionnel/impossible)	Le patient ne peut marcher ou a besoin d'une aide de plus d'une personne
Classe 1 (dépendant niveau 1)	Le patient a besoin de l'aide permanente d'une personne
Classe 2 (dépendant niveau 2)	Le patient a besoin de l'aide intermittente d'une personne
Classe 3 (dépendant supervision)	Le patient a besoin d'un soutien verbal sans contact physique
Classe 4 (indépendant surface plane)	Le patient marche seul, mais a besoin d'une aide pour les escaliers, pentes, terrains accidentés
Classe 5 (indépendant)	Le patient marche seul, quelle que soit la surface

Annexe I.II. Functional Ambulation Classification Modifiée

Classe 0 (non fonctionnel/impossible)	Le patient ne peut marcher ou a besoin d'une aide de plus d'une personne
Classe 1 (dépendant niveau 1)	Le patient a besoin de l'aide permanente d'une personne
Classe 2 (dépendant niveau 2)	Le patient a besoin de l'aide intermittente d'une personne
Classe 3 (dépendant supervision)	Le patient a besoin d'un soutien verbal sans contact physique
Classe 4 (indépendant surface plane)	Le patient marche seul en surface plane, mais le passage des escaliers est impossible
Classe 5	Le patient marche seul en surface plane Le passage des escaliers est possible avec l'aide d'une tierce personne (contact physique ou simple surveillance)
Classe 6	Le patient marche seul en surface plane Le passage des escaliers est possible en utilisant une rampe ou un appui latéral, mais sans assistance ou surveillance de la part d'une tierce personne
Classe 7	Le patient marche seul en surface plane Le passage des escaliers est possible seul mais anormalement : le malade prend plus de temps que la normale, ou franchit les marches en séquence anormale, sans toutefois se servir d'une rampe ou d'un appui latéral et sans assistance ou surveillance
Classe 8 (indépendant)	Le patient marche seul en surface plane et franchit seul les escaliers de façon normale sans se servir de la rampe ou d'un appui latéral avec passage des marches en séquence normale

Annexe II. Motion Sickness Susceptibility Questionnaire Short Form

Présentation :

Ce questionnaire a pour but d'identifier les personnes susceptibles de présenter une cybercinétose lors de l'utilisation d'un dispositif de RV.

Questionnaire / Évaluation :

Indiquez pour chaque type de transport ou divertissement suivant à quelle fréquence vous êtes-vous senti malade ou nauséux.

Pas applicable – Jamais utilisé	Jamais senti malade	Rarement senti malade	Parfois senti malade	Souvent senti malade
t	0	1	2	3

En tant qu'enfant (avant 12 ans) :

1. Voiture	t	0	1	2	3
2. Autobus ou autocar	t	0	1	2	3
3. Train	t	0	1	2	3
4. Avion	t	0	1	2	3
5. Petits bateaux	t	0	1	2	3
6. Navires (féries)	t	0	1	2	3
7. Balançoires (aires de jeux)	t	0	1	2	3
8. Tourniquets (aires de jeux)	t	0	1	2	3
9. Montagnes russes	t	0	1	2	3

Au cours des 10 dernières années :

1. Voiture	t	0	1	2	3
2. Autobus ou autocar	t	0	1	2	3
3. Train	t	0	1	2	3
4. Avion	t	0	1	2	3
5. Petits bateaux	t	0	1	2	3
6. Navires (féries)	t	0	1	2	3
7. Balançoires (aires de jeux)	t	0	1	2	3
8. Tourniquets (aires de jeux)	t	0	1	2	3
9. Montagnes russes	t	0	1	2	3

Annexe III. Simulator Sickness Questionnaire

Présentation :

Ce questionnaire a pour but de détecter l'apparition d'effets secondaires correspondant à une cybercinétose.

Questionnaire / Évaluation

Veillez indiquer à quel point chaque symptôme ci-dessous vous affecte actuellement

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

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

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

$N = 1+6+7+8+9+15+16$

$O = 1+2+3+4+5+9+11$

$D = 5+8+10+11+12+13+14$

$T = (N+O+D) * 3,74$

Annexe IV. Presence questionnaire

Questionnaire sur l'état de présence

1. Dans quelle mesure étiez-vous capable de contrôler les événements ?

Pas du tout			Assez			Complètement
1	2	3	4	5	6	7

2. Dans quelle mesure l'environnement était-il réactif (sensible) aux actions que vous y faisiez ?

Pas assez réactif			Modérément réactif			Complètement réactif
1	2	3	4	5	6	7

3. Dans quelle mesure vos interactions avec l'environnement vous semblaient-elles naturelles ?

Extrêmement artificielles			A mi-chemin			Complètement naturelles
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas du tout			Assez			Complètement
1	2	3	4	5	6	7

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

Extrêmement artificiels			A mi-chemin			Complètement naturels
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas du tout			Modérément trompés			Très trompés
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas ressemblant			Modérément ressemblant			Complètement ressemblant
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas du tout			Assez			Complètement
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas du tout			Assez			Complètement
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas confondante			Modérément confondante			Complètement confondante
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas proche du tout			Plutôt proche			Très proche
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas du tout			Assez			Complètement
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas du tout engagé(e)			Moyennement engagé(e)			Complètement absorbé(e)
1	2	3	4	5	6	7

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

Aucun délai			Délai modéré		Long délai	
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas adapté(e) du tout			Lentement		En moins d'une minute	
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas compétent(e)			Raisonnement compétent(e)		Très Compétent(e)	
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas du tout			Assez incommodé(e)		Tâches complètement empêchées	
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas du tout			Assez interféré		Grandement interféré	
1	2	3	4	5	6	7

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

Pas du tout			Assez		Complètement	
1	2	3	4	5	6	7



Annexe V. System Usability Scale

Présentation :

Questionnaire permettant d'évaluer le sentiment d'utilisabilité du dispositif présenté.

Questionnaire / Évaluation

Les items suivants concernent votre ressenti par rapport à l'activité qui vient de vous être proposée. Veuillez répondre à l'ensemble des items. Pour chaque item, veuillez indiquer à quel point l'affirmation est vraie pour vous.

Pas du tout d'accord					Tout à fait d'accord
1	2	3	4	5	
	1	2	3	4	5
1. Je pense que j'aimerais utiliser ce produit fréquemment					
2. J'ai trouvé le produit inutilement complexe					
3. J'ai trouvé que le produit était facile à utiliser					
4. Je pense que j'aurais besoin de l'aide d'un expert technique pour pouvoir utiliser ce produit					
5. J'ai trouvé que les différentes fonctions de ce produit étaient bien intégrées					
6. J'ai trouvé que ce produit était trop incohérent					
7. J'imagine que la plupart des gens apprendraient très rapidement à utiliser ce produit					
8. J'ai trouvé le produit très difficile à utiliser					
9. J'ai utilisé ce produit avec beaucoup de confiance					
10. J'ai eu besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir commencer à utiliser ce produit					

Annexe VI. Exemple de fichier patient créé à la fin des séances

 GTRV-GC-31 - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage Aide

***** Nom du patient : GTRV-GC-31 *****

Le 21/03/2022 17:48:06

Durée de la séance : 20'2"
Nombre de pas : 1446
Taille du pas : 48 cm
Distance parcourue : 694 mètres

Le 25/03/2022 18:09:26

Durée de la séance : 20'0"
Nombre de pas : 1476
Taille du pas : 48 cm
Distance parcourue : 708 mètres

Etude de tolérance : association de la réalité virtuelle immersive et de l'assistance robotisée à la marche avec des sujets sains

Introduction : La rééducation à la marche robot-assistée chez les patients ayant présenté un AVC a montré son efficacité. Cependant, la répétition de cette tâche spécifique peut entraîner une baisse de la participation active du patient. L'ajout d'un environnement virtuel pourrait être intéressant. L'utilisation de la réalité virtuelle immersive peut entraîner des cas de cybercinétose. L'absence de l'association de ces deux technologies dans la littérature nous amènent à réaliser une étude de tolérance de l'association de la réalité virtuelle immersive et de l'assistance robotisée à la marche sur des personnes saines.

Méthode : L'expérimentation a été conduite sur 37 volontaires majeurs sains. Chaque participant réalisait 2 séances de 20 minutes de marche robot-assistée avec un casque de réalité virtuelle immersive. Nous avons recueilli le score du Simulator Sickness Questionnaire avant et après chaque séance afin de quantifier les effets indésirables ayant pu apparaître.

Résultats : Il n'y a pas eu de différence significative entre le SSQ pré et post séance 1. En revanche, lors de la séance 2, une différence significative a été relevée entre le SSQ pré et post-séance. Ce résultat ne présente pas de pertinence clinique. Les résultats ont montré une excellente tolérance chez nos participants, avec plus de 85% de participants qui n'ont pas eu d'effets indésirables non négligeables.

Conclusion : Le dispositif a obtenu une excellente tolérance chez des sujets sains et jeunes. Il faudrait réaliser cette même étude avec une population de patients ayant présenté un AVC, car nos résultats ne sont pas généralisables.

Mots-clés : Tolérance, Réalité virtuelle, Assistance robotisée à la marche

Tolerance study : association of immersive virtual reality and robot-assisted gait training on healthy people

Introduction : Robot-assisted gait rehabilitation in stroke patients has been shown to be effective. However, the repetition of this specific task can lead to a decrease in active participation of patients. The addition of a virtual environment could be interesting. The use of immersive virtual reality can produce cybersickness. The lack of association of these two technologies in the literature lead us to carry out a tolerance study of the association between immersive virtual reality and robotic walking assistance on healthy people.

Method : The experiment was conducted on 37 healthy adult volunteers. Each participant performed two robot-assisted walking sessions during 20 minutes with a virtual reality headset. We collected the Simulator Sickness Questionnaire score before and after sessions to quantify any adverse effects that may have occurred.

Results : There was no significant difference between the SSQ pre and post-session 1 but in session 2 there was a significant difference between the SSQ pre and post-session. This result is not clinically relevant. The results showed an excellent tolerance in our participants. More than 85% of participants didn't experience any significant adverse effects.

Conclusion : The device was well tolerated in healthy young subjects. The same study should be carried out with a population of stroke patients, as our results are not generalizable.

Keywords : Tolerance, Virtual reality, Robot-assisted gait training

