



HAL
open science

Impact de l'utilisation d'un dispositif de réalité virtuelle immersive sur le contrôle moteur lors d'un Timed Up and Go

Frédéric Muhla

► **To cite this version:**

Frédéric Muhla. Impact de l'utilisation d'un dispositif de réalité virtuelle immersive sur le contrôle moteur lors d'un Timed Up and Go. Biomécanique [physics.med-ph]. Université de Lorraine, 2020. Français. NNT : 2020LORR0206 . tel-03229668

HAL Id: tel-03229668

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03229668v1>

Submitted on 19 May 2021

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

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



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Ecole Doctorale BioSE (Biologie-Santé-Environnement)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

par **Frédéric Muhla**

Impact de l'utilisation d'un dispositif de réalité virtuelle immersive sur le contrôle moteur lors d'un Timed Up and Go.

Le 10 décembre 2020

Membres du jury :

Rapporteurs :

M. William Bertucci	PR, EA 7507 PSMS, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims.
M. Abderrahmane Rahmani	PR, EA 4334 MIP, Université du Maine, Le Mans.

Examineurs :

Mme. Louise Tyvaert	PU-PH, UMR 7039 CRAN, Université de Lorraine, Nancy.
Mme. Natacha Heutte	PR, EA 3832 CETAPS, Université de Rouen, Mont-Saint-Aignan.

Membres invités :

M. Philippe Meyer	Médecin Chef, OHS de Meurthe et Moselle, Nancy.
--------------------------	---

Directeurs de thèse :

M. Gérome Gauchard	PR, EA 3450 DevAH, Université de Lorraine, Nancy.
Mme. Sophie Colnat-Coulbois	PU-PH, UMR 7039 CRAN, Université de Lorraine, Nancy.

Résumé :

Le risque de chute chez la personne âgée est un enjeu majeur de santé publique. Sa détection précoce permettrait d'intervenir en amont de la première chute ou en prévenir la récurrence en proposant de l'activité physique préventive adaptée. Or, l'évaluation d'un risque de chute avec les tests et échelles fréquemment utilisés ne donne pas pleinement satisfaction. Les récentes innovations technologiques dans le domaine de la réalité virtuelle immersive laissent penser que son utilisation dans l'évaluation des risques de chute pourrait combler certains manques de contextualisation et d'uniformité des tests actuels. Toutefois, avant d'utiliser ces technologies dans l'évaluation du risque de chute, il est important de connaître leur impact sur le comportement moteur. Pour cela, nous avons choisi de tester une tâche locomotrice, le Timed Up and Go (TUG - test clinique très utilisé par les cliniciens et véritable « gold standard » dans l'évaluation des risques de chute chez la personne âgée), en environnement réel et en environnement virtuel auprès de personnes âgées ainsi que de jeunes adultes. Des différences sont observées avec des augmentations du temps et du nombre de pas en réalité virtuelle. Ainsi, la réalité virtuelle immersive pourrait être une piste de choix dans l'évaluation du risque de chute par l'augmentation de la sensibilité et de la spécificité des tests puisqu'elle permet de contextualiser l'environnement de test. Toutefois, cette solution pourrait n'être que temporaire étant donné les promesses de la réalité mixte qui permettrait, elle, à la fois de contextualiser le test dans l'environnement réel avec un contrôle numérique des contraintes qui peuvent être ajoutées à cet environnement.

Mots clés :

Réalité virtuelle immersive - Timed Up and Go - Contrôle moteur - Vieillesse - Risque de chute

Abstract :

Risk of fall in the elderly is a major public health issue. Its early detection would make it possible to intervene before the first fall or prevent its recurrence by offering suitable preventive physical activity. However, the assessment of a fall risk with frequently used tests and scales is not fully satisfactory. Recent technological innovations in the field of immersive virtual reality suggest that its use in the assessment of fall risk could fill some gaps in contextualization and uniformity of current tests. However, before using these technologies in the fall risk assessment, it is important to know their impact on motor behavior. To do this, we chose to test a locomotor task, the Timed Up and Go (TUG - a clinical test widely used by clinicians and a real “gold standard” in the evaluation of the risk of falls in the elderly), in a real environment. and in a virtual environment with the elderly as well as young adults. Differences are observed with increases in time and number of steps in virtual reality. Thus, immersive virtual reality could be an avenue of choice in the assessment of the risk of falls by increasing the sensitivity and specificity of the tests since it allows to contextualize the test environment. However, this solution could only be temporary given the promises of mixed reality which would allow both to contextualize the test in the real environment with digital control of the constraints that can be added to this environment.

Keywords :

Immersive virtual reality - Timed Up and Go - Motor control - Ageing - Risk of fall

Remerciements

Je tiens à remercier les Professeurs Gérome Gauchard et Sophie Colnat-Coulbois pour l'encadrement de cette thèse et leur appui en toutes circonstances durant ces 4 années.

Pour leur bienveillance et leurs précieux conseils, je remercie les membres de mon comité de suivi individuel de thèse.

Je remercie l'équipe de direction ainsi que les membres du laboratoire 3450 EA DevAH pour leur accueil, leur collaboration et les critiques à la fois pertinentes et constructives qu'ils ont pu formuler.

A toutes les personnes de l'équipe de l'OHS Centre Florentin sans qui nous n'aurions pas pu mener ce projet à terme, pour leur soutien et leur présence sans faille lors la conception des scénarios et pour les nombreuses heures qu'ils nous ont consacrées lors des mesures, un immense merci.

Je remercie également Fabien Clanché, ingénieur, pour cette collaboration de longue haleine et en anticipation pour toutes les prochaines sur de nouveaux projets.

Toutes les petites mains qui m'ont assisté en de nombreuses occasions méritent également toute ma reconnaissance pour leur implication, je tiens donc à exprimer ma gratitude envers tous les doctorants et les stagiaires qui se sont succédé et qui ont su se rendre indispensables.

Il est également important pour moi de remercier ici toutes les personnes qui ont volontairement donné de leur temps et se sont prêtées à nos protocoles d'expérimentation.

Enfin, je remercie les membres du jury pour le temps passé à l'étude de ce manuscrit ainsi que celui consacré à la défense de thèse.

Table des matières

I.	Préambule	1
II.	Introduction	2
2.1.	Le vieillissement et la chute : facteurs de risque et évaluation clinique.....	2
2.1.1.	Chute et équilibre : définitions	2
2.1.2.	Chute : épidémiologie	3
2.1.3.	La chute multifactorielle	4
2.1.4.	Le vieillissement	5
a)	Les types de vieillissement.....	5
b)	Dégénérescence musculaire	6
c)	Dégénérescence osseuse.....	7
d)	Dégénérescence articulaire.....	7
e)	Incontinence	8
f)	Les altérations sensorielles	8
2.1.5.	Facteurs de risque de chute	10
a)	Facteur d'âge.....	10
b)	Facteur de genre	10
c)	Comorbidités	11
d)	Troubles de l'équilibre	11
e)	Troubles de la marche	12
f)	Chutes répétées.....	13
g)	Hypotension orthostatique.....	14
h)	Fragilité	14
2.1.6.	Les tests et échelles pour l'évaluation du contrôle moteur (risque de chute, équilibre, tonus musculaire...) à destination notamment des personnes âgées.....	15
a)	(Get) Up and Go.....	15
b)	Timed Up and Go.....	16
c)	Test de Tinetti	19
d)	Echelle d'équilibre de Berg	20
e)	Equilibre unipodal	20
f)	Test de poussée sternale	21
g)	BESTest.....	22
h)	Echelle de Morse.....	23
i)	Test de Fukuda	23
j)	Test de marche de 6 minutes	24
k)	Cinq assis et relevés de chaise.....	24

l) Dynamic Gait Index	24
m) Bilan des tests.....	25
2.2. Introduction d'une nouvelle technologie au service du risque de chute : la Réalité Virtuelle.....	26
2.2.1. Définition	26
a) Immersion	27
b) Interaction	28
c) Notion de Présence.....	30
2.2.2. La réalité virtuelle dans la littérature scientifique	30
a) Génération Wii et Kinect.....	30
b) Réalité virtuelle non-immersive et littérature scientifique	32
2.2.3. L'avènement des visiocasques	33
a) Les dernières améliorations sur les visiocasques.	36
b) Quid de casques plus confidentiels ?.....	37
c) Les interactions, entre technologies éprouvées et expérimentales	37
2.2.4. CAVE (Cave Automatic Virtual Environment).....	41
2.2.5. Quelles différences entre les visiocasques et le CAVE ?.....	43
a) Zone d'exploration	43
b) Coût.....	44
c) Exportabilité et compatibilité.....	45
d) Isolement versus transparence.....	45
e) Expérience multi-utilisateurs.....	46
2.2.6. Qu'attendre de la réalité virtuelle pour la recherche ?	47
a) Quels seraient les avantages de la réalité virtuelle pour la recherche.....	48
b) D'autres « réalités ».....	50
2.2.7. L'importance du choix technologique.....	53
2.2.8. Limites des visiocasques	54
a) Technologie.....	54
b) Ergonomie	55
c) Cinétose.....	56
2.2.9. Le sentiment de Présence	57
a) Définition	57
b) Les cinq piliers	58
c) Slater	58
d) iGroup Presence Questionnaire (Annexes p.165).....	59
III. Objectifs et hypothèses	60
IV. Participants, Matériel et Méthode.....	63

4.1.	Participants	63
4.2.	Tâche	63
4.3.	Réalité virtuelle.....	65
4.3.1.	Matériel	65
4.3.2.	Scénario et environnement virtuels	65
4.4.	Métrologie	66
4.4.1.	Temps	66
4.4.2.	Nombre de pas.....	67
4.4.3.	Présence.....	67
V.	Résultats et discussions spécifiques à chaque étude.....	68
5.1.	Abréviations et dénominations anglaises	68
5.2.	Etude #1 : Impact of using immersive virtual reality over time and steps in the Timed Up and Go test in elderly people.....	69
5.2.1.	Objectifs et hypothèses.....	69
5.2.2.	Méthodologie spécifique	69
5.2.3.	Résultats	69
a)	Temps.....	70
b)	Nombre de pas.....	71
c)	Présence.....	73
d)	« Effet Réalité Virtuelle »	73
5.2.4.	Discussion	74
a)	Marche.....	75
b)	Se lever.....	76
c)	Demi-tour	77
d)	S’asseoir	78
e)	Présence.....	79
f)	Effet « Réalité virtuelle »	79
5.3.	Etude #2 : Does the management of visual and audible motion information during an immersive virtual reality Timed Up & Go test impact locomotor performance in the elderly?	
5.3.1.	Objectifs et hypothèses.....	81
5.3.2.	Méthodologie spécifique	81
5.3.3.	Résultats	82

a)	Temps.....	82
b)	Nombre de pas.....	84
5.3.4.	Discussion	86
5.4.	Etude #3 : Is young adults motor control as affected as for elders using immersive virtual reality?	89
5.4.1.	Objectifs et hypotheses.....	89
5.4.2.	Méthodologie spécifique	89
5.4.3.	Résultats	90
a)	Temps pour les Jeunes Adultes	91
b)	Nombre de pas pour les Jeunes Adultes	93
c)	Temps pour les Personnes Agées	95
d)	Nombre de pas pour les Personnes Agées.....	97
e)	Impact des conditions sur le temps, normalisation.....	99
5.4.4.	Discussion	110
5.5.	Etude #4 : Age impact on presence feeling in immersive virtual reality.	116
5.5.1.	Objectifs et hypothèses.....	116
5.5.2.	Méthodologie spécifique	116
5.5.3.	Résultats	116
5.5.4.	Discussion	120
VI.	Discussion générale	123
VII.	Perspectives : Evaluer le risque de chute en réalité virtuelle.	127
7.1.	MéMoSim’S TUG Simulator XX.....	127
7.1.1.	Contexte	127
7.1.2.	Pistes pour l’automatisation de métriques : Chronométrage	129
7.1.3.	Pistes pour l’automatisation de métriques : Trajectoires	130
7.2.	PrévSim	133
7.2.1.	Réflexion préliminaire.....	133
7.2.2.	Tâches.....	133
a)	Tâches posturales	133
b)	Tâches locomotrices.....	135
7.2.3.	Mesure objective	137
a)	Cinématique	137
b)	Cinétique	137
c)	Physiologie.....	137

d) Attention visuelle	138
e) Psychologie	138
f) Recensement des chutes	138
7.2.4. Objectifs sur les traitements de données	138
7.2.5. Développements logiciels	139
7.2.6. Publications	139
7.3. Mise au point d'un démonstrateur estimant le risque de chute	140
7.3.1. Réalité virtuelle	140
7.3.2. Métrologie	141
7.3.3. Machine Learning	141
7.4. Evaluation du sentiment de présence avec la représentation du corps dans l'environnement virtuel.	142
VIII. Conclusion	143
Bibliographie	144
Annexes 165	
iGroup Presence Questionnaire	165
Valorisation	168

Liste des abréviations :

ADL - Activities Daily Living

AQM - Analyse Quantifiée de la Marche

ATH - Affichage Tête Haute

BESTest - Balance Evaluation Systemes Test

CAVE - Cave Automatic Virtual Environment

DGI - Dynamic Gait Index

FES - Fall Efficacy Scall (Tinetti)

FOG - Freezing Of Gait

GPS - Global Positioning System

GSR - (Galvanic Skin Response

HAS - Haute Autorité de Santé

HVL - Hôpital Virtuel de Lorraine

INSERM - Institut National de la Santé Et de la Recherche Médicale

IPQ - Igroup Presence Questionnaire

IPS - Images Par Seconde

OHS - Office d'Hygiène Sociale

PC - Personal Computer

PCV - Primitives Comportementales Virtuelles

POMA - Performance Oriented Mobility Assessment

PPI - Pixel Per Inch

RV ou VR - Réalité Virtuelle ou Virtual Reality

STAPS - Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

TUG - Timed Up and GO

WBB - Wii Balance Board

I. Préambule

Ce travail de thèse s'inscrit dans le projet Hôpital Virtuel de Lorraine (HVL), porté par le Collegium-Santé, qui a bénéficié notamment des Fonds Européens de Développement Régional. Ce vaste projet dont l'enjeu est : « jamais la première fois sur le patient » a contribué à développer les outils de formation pour plusieurs composantes de l'Université de Lorraine, à savoir la Faculté de Médecine, d'Odontologie, de Pharmacie et des Sciences du Sport de Nancy. Concernant la Faculté des Sciences du Sport de Nancy (STAPS), l'objectif « simulation » était la mise en place d'un centre d'expertise, le Centre MéMoSim'S (Métrologie, Modélisation, Simulation en Sport et en Santé), dont l'objet est d'être un environnement propice pour les activités de recherche pluridisciplinaire en sciences du mouvement humain. Pour ce projet, MéMoSim'S visait à la détection et/ou prédiction du risque de chute au cours du vieillissement normal et pathologique.

Le projet général consiste à mettre la simulation et le virtuel au bénéfice de la formation notamment des praticiens de santé. Il s'agit alors de proposer d'intervenir sur des patients virtuels dans des conditions au plus proche d'une véritable intervention dans la limite de ce que permet la technologie. La formation des futurs praticiens de santé va permettre de réduire le stress et de développer des compétences techniques et comportementales avant d'intervenir auprès de véritables patients [1].

La Faculté des Sciences du Sport de Nancy, spécialisée dans le comportement moteur chez l'homme, a contribué et continuera à apporter son expertise dans l'analyse du mouvement pour l'évaluation du risque de chute chez les personnes âgées d'une part et d'autre part en créant un « jeu sérieux » pour la formation des intervenants en activité physique adaptée. La première partie du projet a nécessité de nombreux développements tant sur la réalité virtuelle que sur la métrologie, qui se sont déroulés en parallèle de la validation de l'étude par un comité de protection des personnes, il est prévu que les données retirées de cette expérimentation alimentent le jeu sérieux. Les travaux de cette thèse s'inscrivent comme une base préliminaire essentielle au projet HVL puisqu'ils vont tenter de décrire l'impact de la technologie de réalité virtuelle sur le comportement moteur mais aussi l'impact du scénario sur ce même comportement moteur et enfin l'impact des caractéristiques humaines sur l'effet Réalité Virtuelle ainsi que sur le sentiment de présence. Une meilleure compréhension des modulations motrices ou comportementales induites par la réalité virtuelle devrait permettre d'aborder plus efficacement la recherche utilisant ces technologies.

II. Introduction

2.1. Le vieillissement et la chute : facteurs de risque et évaluation clinique

2.1.1. Chute et équilibre : définitions

La chute prend diverses définitions souvent liées au contexte dans lequel elle est étudiée. Toutefois, Hauer en 2006, après avoir regroupé 90 articles traitant de la chute, propose une définition reposant sur les paramètres constants qui la caractérisent : La chute est un **événement inattendu** dans lequel le participant **se retrouve allongé** sur le **sol** ou à un niveau inférieur. L'auteur suggère également d'inclure la notion d' « allongé » lorsque la question est posée : « Avez-vous chuté, comprenant des glissades ou trébuchements dans lesquels vous avez perdu l'équilibre et avez atterri sur le sol ou à un niveau inférieur ? ». De nombreux auteurs ayant étudié la chute et apparaissant dans cette revue de littérature ont par exemple exclu les chutes résultant d'un acte médical et/ou d'une poussée, considérant que cela peut arriver indépendamment de l'âge. L'événement est alors plutôt qualifié d'accident [2].

L'équilibre postural ou stabilité posturale est une condition définie par la projection du centre de gravité dans les limites du polygone de sustentation déterminé par la surface entre les appuis, c'est-à-dire les pieds et toute assistance (ex : canne, déambulateur...). L'équilibre dynamique prend en compte la position du centre de gravité ainsi que sa vitesse de déplacement par rapport au polygone de sustentation. Ainsi, une personne peut-être dynamiquement instable quand les conditions de stabilité posturale sont réunies. La chute survient lorsque l'équilibre dynamique est perdu et n'est pas restauré. Elle est donc le résultat de deux événements : partir d'un équilibre dynamique vers une instabilité dynamique suivie de l'incapacité à compenser le déséquilibre et restaurer une condition d'équilibre dynamique [3, 4, 5].

Selon France Mourey, « la chute n'est pas tant un point de départ au déclin des capacités de la personne, mais c'est déjà le témoin d'un déclin avancé » (conférence publique à Nancy). La chute survient parce que les capacités à faire face aux contraintes imposées par l'environnement à un instant donné ne sont déjà plus suffisantes. Cet événement de chute, selon son niveau de gravité, est alors considéré comme un catalyseur du déclin fonctionnel pouvant marquer une rupture. En effet, les douleurs, l'immobilisation ou les restrictions conséquentes à la chute vont contribuer à une forme de sédentarité et de restriction d'activité impactant directement les capacités fonctionnelles et la qualité de vie.

Le caractère répétitif des chutes est également un signal d'alarme important, communément, on considère des chutes comme répétées s'il en survient deux ou plus dans une année. Elles sont souvent corrélées à l'âge de la personne passant de 7% pour la décennie à partir de 64 ans à 19% pour la décennie à partir de 75 ans et à 25% après 84 ans [6]. L'institutionnalisation est également un facteur corrélé à la chute répétée [6, 7, 8]. La répétitivité des chutes est aussi influencée par les polymorbidités [9, 10].

2.1.2. Chute : épidémiologie

Tinetti met en évidence en 1988 un taux de chute (au moins une dans l'année) de 32% sur sa cohorte de participants âgés (>75 ans) autonomes. Parmi ces chuteurs, 46% ont chuté une seule fois, 29 ont chuté deux fois et 25 % ont chuté au moins trois fois [11]. L'évolution du pourcentage de personnes âgées chuteuses entre 1981 [12] et 2006 [13] passant de 28% à 33%, suggère que les efforts produits pour réduire le risque de chute durant les dernières décennies n'ont pas suffisamment porté leur fruit [3].

Aux Etats-Unis, une étude s'est basée sur les données fournies par les Centers for Disease Control and Prevention rapportant en 2005 plus de 15000 décès, dans les 3 mois, consécutifs aux blessures occasionnées par la chute chez des personnes âgées (≥ 65 ans) [14]. L'analyse détaillée qui est proposée, notamment des différents Etats, du genre, de l'origine ethnique, du statut marital, etc. pourrait permettre des actions de prévention localisées. Il est à préciser que ces données mettent en évidence des chutes déclarées, il doit donc y avoir encore de nombreuses chutes non déclarées ou ne bénéficiant pas nécessairement d'un bilan médical, qui ne sont pas prises en compte dans ces études. Le vieillissement de la population et l'augmentation de la durée de vie moyenne devrait faire augmenter le nombre de personnes âgées jusqu'à 70 millions en 2030 aux Etats-Unis [15]. Dans un système de santé tel qu'aux Etats-Unis, cela pose la question de l'évolution des tarifs et donc de l'accessibilité aux soins.

En France, environ un quart des personnes âgées de 65 à 85 ans déclarent chuter chaque année [16], avec un taux estimé à plus de 30% dans les pays industrialisés [17]. Les chutes sont souvent classées dans les accidents de la vie courante qui sont généralement liés à des maladies chroniques ou à des situations de détresse psychologique. Par exemple, 56.5% des personnes ayant subi un accident déclarent essentiellement des chutes et, parmi les personnes ayant présenté un événement de type chute, 51.3% ont chuté plus d'une fois au cours des 12 derniers mois [18]. La chute est influencée par l'âge, le sexe [19] ou encore le niveau de formation [20]. La chute est aussi la cause directe de nombreuses complications, parmi lesquelles les fractures, les hospitalisations prolongées, le déclin fonctionnel, la fragilité et l'institutionnalisation [21,

22]. Par ailleurs, près de 20% des personnes âgées de 55 à 85 ans déclarent avoir limité leurs déplacements en raison de la peur de tomber [18, 23]. La chute est reconnue comme étant la première cause de décès par accident après 65 ans [24] et est responsable d'environ 5000 à 9000 décès par an sur le territoire français [17, 25]. Les chutes sont la conséquence d'une interaction complexe de facteurs de risque. Au fur et à mesure que le nombre de facteurs de risque augmente, les risques de chute et de blessure deviennent plus élevés [26]. La littérature traite majoritairement la chute pour le cas des personnes âgées, conséquence du vieillissement, et des personnes atteintes de la maladie de Parkinson en raison des symptômes associés.

2.1.3. La chute multifactorielle

La chute est un événement multifactoriel résultant d'une interaction malencontreuse entre des facteurs intrinsèques à la personne et un environnement particulier à un instant déterminé [27].

Parmi les facteurs intrinsèques on va retrouver, de manière non exhaustive des facteurs ponctuels tels qu'un niveau de fatigue, physique et/ou cognitive, plus élevé que la normale, une douleur localisée, une maladie, une médication ou une absorption de substances pouvant altérer le maintien de l'équilibre. On peut également observer un comportement à risque car basé sur une surestimation de ses propres capacités (motrices notamment). Ces facteurs ponctuels vont s'ajouter à un panel de facteurs plus chroniques tels que les conséquences du vieillissement sur les différentes fonctions, des handicaps ou pathologies physiques et/ou cognitives et/ou sensorielles.

La personne soumise à ses propres capacités à un instant précis va alors être confrontée à des contraintes environnementales qu'elle devra surmonter. Les interactions des personnes âgées avec leur environnement quotidien, essentiellement le domicile, ont été largement étudiées [28, 29] et ont pu bénéficier d'avancées techniques et ergonomiques pour faciliter la vie des séniors. On peut citer notamment les surfaces antidérapantes, les poignées et baignoires assises dans les salles de bain, lieu favorable aux accidents de la vie courante. L'optimisation des lieux de vie comme les cuisines où l'accessibilité a été retravaillée pour correspondre par exemple aux capacités des personnes âgées ou à des limitations physiques spécifiques. Malgré les améliorations importantes apportées au lieu de vie, des contraintes plus difficilement prévisibles subsistent telles que la présence de personnes et/ou d'animaux pouvant faire trébucher, distraire, ou pousser les personnes âgées dont les capacités à se rattraper sont limitées. D'autres proviennent indirectement du comportement de la personne qui va déposer des obstacles au sol comme un sac à main ou sac de commissions, laisser un tiroir près du sol

ouvert ou la porte du lave-vaisselle baissée. Le facteur environnemental de cause comportementale le plus commun est nocturne et implique une personne souhaitant aller aux commodités sans allumer la lumière [30]. Cette situation particulière et fréquente [6, 31] est le parfait exemple pour une analyse des facteurs de risque que cette situation engendre :

- Facteurs intrinsèques ponctuels : fatigue (réveil au milieu de la nuit), vision sensible et limitée, désorientation, incontinence nécessitant d'agir rapidement.
- Facteurs intrinsèques chroniques : douleurs articulaires, diminution des capacités sensorielles, physiques et cognitives (attention), peur de chuter, sur-estimation des capacités perçues et sous-estimation des contraintes environnementales.
- Facteurs environnementaux : absence d'éclairage, mobilier encombrant sur le chemin, chaussures inappropriées (ex : charentaises ne permettant pas de lever correctement les pieds), objet(s) déposé(s) au sol dans le chemin, animal éveillé traversant devant les pieds de la personne, tapis corné, sol glissant.

S'il est possible d'adapter le domicile aux capacités de chaque individu, il est évidemment plus compliqué de le faire à l'extérieur, dans les lieux publics, ne serait-ce que parce qu'ils sont soumis aux conditions climatiques. Ainsi, le risque de chute peut dépendre de la saison, du moment de la journée, des conditions climatiques, de l'éclairage, de l'endroit, de la qualité du chemin emprunté. L'environnement, c'est aussi les autres personnes, on va alors avoir d'autres facteurs de risques lorsqu'il y a de la foule, de la circulation, des animaux, du bruit etc. [32, 33]. L'association de ces facteurs de risque intrinsèques et extrinsèques va potentiellement conduire à une chute.

2.1.4. Le vieillissement

a) Les types de vieillissement

La chute, pour le cas de ses facteurs intrinsèques tout du moins, va être largement influencée par les conséquences du phénomène de vieillissement. L'analyse du vieillissement va donner de nombreux indices explicatifs du fonctionnement des personnes âgées pour interagir avec leur environnement et orienter les stratégies à mettre en place pour en diminuer les effets.

La Haute Autorité de Santé (HAS) considère une personne comme « âgée » lorsqu'elle atteint 65 ans [34], seuil largement utilisé dans la littérature médicale. Le vieillissement est globalement hétérogène [17] et peut se dérouler de plusieurs manières dépendantes notamment de l'autonomie et de la qualité de vie [26] :

- Vieillesse physiologique est celui qui se déroule dans les meilleures conditions, la personne est en bon état de santé, indépendante et bien intégrée socialement. Elle est autonome d'un point de vue décisionnel et fonctionnel, assimilable aux adultes plus jeunes.
- Le vieillissement fragile est un état de santé intermédiaire où la personne risque de basculer dans la catégorie du vieillissement pathologique. Il s'agit d'une population vulnérable avec des limitations fonctionnelles motrices et cognitives et une diminution de la capacité d'adaptation. Le terme de fragilité est souvent décliné au travers de 3 approches complémentaires : médicale (syndrome clinique), fonctionnelle (limitation dans la vie quotidienne) et physiologique (perte des réserves physiologiques et susceptibilité à l'incapacité) [34, 35, 36, 37].
- Le vieillissement pathologique décrit des personnes dépendantes et en mauvaise santé, souvent à cause de polypathologies chroniques générant handicap et isolement social [10, 38].

L'avancée en âge s'accompagne généralement de diminutions des capacités motrices, sensorielles et cognitives pouvant un jour faire basculer le vieillissement dans les catégories fragile et pathologique. Les atteintes sont multiples et cumulées, elles peuvent également empirer par interaction.

b) Dégénérescence musculaire

Les diminutions constatées au niveau du système moteur peuvent être d'ordre musculaire. La sarcopénie se caractérise par une diminution des capacités musculaires due à l'âge qui sera la cause d'une baisse de la force musculaire et des performances physiques, avec une perte d'environ 50% entre 20 et 80 ans [39, 40, 41, 42]. La définition actuelle de la sarcopénie englobe également la diminution de la force, de la masse et de la qualité musculaire [43]. Si l'avancée en âge est le principal facteur de la sarcopénie, d'autres facteurs peuvent accélérer et aggraver le phénomène comme la dénutrition et la sédentarité [44]. D'après Munro en 1982, à partir de 30 ans la dégénérescence musculaire est d'environ 3 à 8% toutes les décennies avec une accélération du processus à partir de 50 ans ; le muscle est alors transformé en masse grasse, donc non contractile [45].

A partir de 50 ans la dégénérescence passe à 1 ou 2% par an [46] et la force musculaire décline de 1.5% chaque année soit environ 15% entre 50 et 60 ans et ensuite 3% tous les ans soit environ 30% par décennie après 60 ans [47, 48, 49, 50, 51, 52]. L'association de la faible

masse musculaire à de faibles performances motrices revient alors à associer la sarcopénie au risque de chute [53, 54, 55].

Plusieurs études montrent que ces atteintes musculaires vont alors témoigner d'un risque de chute [56, 57] ou encore, lorsque cela affecte la vitesse de marche ainsi que l'équilibre [58, 59], d'un risque de fracture [60]. Avec l'âge, la dénutrition aggrave la sarcopénie en rendant insuffisants les apports en protéines et en énergie [61, 62].

c) Dégénérescence osseuse

L'ostéoporose se caractérise par une faible masse osseuse, une détérioration micro architecturale des tissus osseux ainsi qu'une diminution de la résistance [63]. Chez l'adulte, le cycle de remodelage osseux s'effectue de manière équilibrée entre l'action des ostéoclastes et des ostéoblastes. Cependant, une déficience en œstrogènes, de hauts niveaux de glucocorticoïdes, des modifications du niveau de calcium, des fluctuations des niveaux d'hormones parathyroïdiennes ou encore des changements dans les niveaux d'hormones de croissance vont impacter cet équilibre en faveur d'une perte osseuse [64].

L'ostéoporose et les fractures qui en découlent sont généralement associées à une augmentation de la mortalité [65]. Pour le cas d'une fracture au niveau de la hanche, le décès survient généralement dans les 3 à 6 mois suivant l'événement dont 20 à 30% sont dues spécifiquement à l'événement (fracture) [66, 67].

L'ostéoporose impacte environ 50% des femmes et 20% des hommes âgés de plus de 50 ans [64] et cette différence s'explique notamment par le déficit en œstrogènes chez la femme ménopausée. Ce déficit déséquilibre le couple ostéoclaste/ostéoblaste et contribue à la diminution de la densité osseuse [68, 69]. S'ajoutent à cela une moindre force chez les femmes ostéoporotiques favorisant les chutes [70] et il semble qu'elles soient également plus sujettes à la cyphose dorsale et la peur de chuter [71]. La cyphose intervient alors en tant que facteur limitant à l'équilibration [72].

d) Dégénérescence articulaire

La dégénérescence du système moteur s'accompagne également d'atteintes au niveau des articulations avec notamment de l'arthrose. L'arthrose génère des douleurs au niveau des articulations qui vont favoriser la chute [73]. L'arthrose (associée à un déficit visuel) multiplierait par 2.5 le risque de chute [3, 74]. D'après l'INSERM, l'arthrose est caractérisée par une destruction du cartilage qui s'étend à toutes les structures de l'articulation et parmi les facteurs de risque identifiés on retrouve l'âge (3% des moins de 45 ans, 65% des plus de 65 ans

et 80% des plus de 80 ans), les désordres métaboliques comme le diabète ou l'obésité, une pression articulaire excessive (port de charge, surcharge pondérale, chocs), des maladies articulaires, une fragilité héréditaire. Les zones majoritairement touchées sont la colonne vertébrale (70 à 75% des 65-75 ans), les doigts et enfin genou/hanche (respectivement 30 et 10% des 65-75 ans). L'atteinte des genoux et hanches représente une limitation fonctionnelle importante affectant le système locomoteur supportant le poids du corps [75].

e) Incontinence

Certaines fonctions physiologiques telles que contrôle urinaire diminuent avec l'âge soumettant ainsi la personne à un trouble particulier pouvant entraîner d'autres problèmes. En effet, de manière générale, l'incontinence peut devenir un facteur de restriction d'activité et de sédentarité [26]. On retrouve différents types d'incontinence qui peuvent être associés à des facteurs de risque spécifiques : l'incontinence urinaire d'effort [76], l'envie impérieuse [77] et la nycturie [78]. Par exemple, la nycturie, obligeant la personne à se lever une ou plusieurs fois au cours de la nuit, va impacter la qualité du sommeil, morcelant ainsi les cycles [79]. La chronicité de ces troubles du sommeil finit par affecter la journée avec un effet sur l'humeur, la qualité de vie et la santé [80, 81, 82, 83]. L'envie impérieuse, soudaine et irrépressible est souvent impossible à différer. Prévalente chez les femmes âgées [84], elle va être à elle seule restrictive d'activité et facteur de risque de chute. Un lien peut être fait entre l'incontinence et la peur de chuter où le caractère urgent de l'envie impérieuse va nécessiter d'agir rapidement et de se précipiter vers des toilettes pour éviter un épisode incontinent, ce que certaines personnes ne sont plus capables de faire [77].

f) Les altérations sensorielles

Le vieillissement atteint également certains organes sensoriels diminuant le nombre, atténuant la qualité ou biaisant ainsi les informations perçues. Pour le cas de la vision, dont les informations sont privilégiées par rapport à celles des autres modalités [85], une étude montre que presque toutes les personnes âgées de plus de 65 ans vont avoir des problèmes d'accommodation. D'autres troubles peuvent être liés au risque de chute tels que l'acuité visuelle, la perception de la profondeur, la réduction du champ visuel et la sensibilité aux contrastes qui sont retrouvés chez 10% des 65-75 ans et 20% des plus de 75 ans [86, 87, 88, 89, 90]. Les cataractes forment la plus commune des causes de cécité réversible [91]. Observant l'importance de la vision dans le maintien de l'équilibre, sous-entendu éviter la chute, des études contradictoires indiquent d'un côté une réduction du risque de chute après correction

(chirurgie du premier œil) [92] et une absence d'amélioration voire détérioration du maintien de l'équilibre [93] (chirurgie du deuxième œil) [94]. Cet exemple montre l'importance de caractériser le risque de chute de manière plurifactorielle, un unique défaut de vision n'expliquant pas à lui seul le risque de chute [26], toutefois, l'addition des différents troubles évoqués est un facteur de risque aggravé [95].

L'atteinte des facultés auditives ou presbyacousie va isoler la personne des sons de l'environnement notamment, avec un impact direct sur la prise d'informations pouvant alors contribuer au risque de chute [96]. Mais cet isolement va également contribuer au déclin cognitif et mobiliser les ressources attentionnelles habituellement dédiées au contrôle postural pour compenser la perte auditive, pouvant multiplier par 3 le risque de chute [97, 98]. En plus du phénomène de compensation de la perte d'audition mobilisant l'attention, cette hypoacousie va également contribuer à la restriction d'activité qui s'autoalimente en générant une sédentarité toujours plus importante. Une corrélation entre la baisse des capacités auditives et la réduction des paramètres de la marche (vitesse de marche, endurance) et augmentation des difficultés à marcher [99]. Le caractère prédictif de cette perte d'audition pour l'augmentation du risque de chute a également été mis en avant avec le suivi des participants sur 3 ans. Il est à noter que la perte d'audition et d'acuité visuelle ne font plus consensus en tant que facteurs de risque de chute [100], il apparaît donc nécessaire d'évaluer toute une cohorte de facteurs de risques pour qualifier un risque de chute.

Le vieillissement a un impact négatif sur la perception haptique [101, 102, 103, 104], cependant, il affecte de manière inégale les différentes informations. Par exemple, les personnes âgées peuvent percevoir et discriminer une forme en trois dimensions de la même manière que des personnes plus jeunes [105], par contre ils auront plus de difficultés à percevoir le matériau de l'objet et pourraient avoir besoin de plus de temps pour l'identifier car les auteurs ont limité l'exploration tactile à 6 secondes [105, 106].

L'interaction de l'homme avec son environnement peut conduire à la chute, c'est pourquoi il est nécessaire d'adapter au mieux aux besoins et capacités des personnes. On retrouve notamment des adaptations aux handicaps dans les lieux publics et les domiciles des personnes concernées. Il s'agit d'ergonomie et d'accessibilité. Toutefois, l'environnement n'est pas toujours adapté à toutes les personnes ou toutes les situations. Ainsi, pour l'incertitude et la variabilité que cela génère, il est nécessaire que l'Homme lui-même puisse s'adapter rapidement aux contraintes de son environnement. Or, le vieillissement va diminuer les capacités d'adaptation des personnes âgées.

Nous savons qu'il existe des facteurs de risque, de nombreuses études ont fait le lien entre des constantes observées et qui sont corrélées à la chute. L'intérêt est ici de faire le lien entre les conséquences du processus de vieillissement et les impacts au niveau fonctionnel. Autrement dit, comment se traduisent les altérations des systèmes moteur, cognitif, sensoriel et physiologique sur le comportement global.

2.1.5. Facteurs de risque de chute

Au-delà du processus de vieillissement lui-même, d'autres facteurs vont intervenir dans l'augmentation du risque de chute et former une somme de paramètres, parfois interactifs, qui vont expliquer la propension de certains individus à chuter dans un avenir plus ou moins proche.

a) Facteur d'âge

Il a été montré que l'âge n'avait qu'une incidence relative sur le vieillissement (physiologique, fragile, pathologique), cette incidence est limitée par les antécédents de vie qui conditionnent la précocité de certaines baisses des capacités. Les processus associés au vieillissement vont alors apporter à la population âgée une hétérogénéité importante. Toutefois, comme pour l'exemple de la dégénérescence musculaire, au-delà de 65 ans et par tranches de 5 ou 10 ans de manière générale, l'avancée en âge va rassembler un certain nombre de paramètres qui témoignent du vieillissement et qui contribuent à la diminution des capacités fonctionnelles et donc à l'augmentation du risque de chute. L'avancée en âge affecte par exemple les paramètres de la marche, leur offrant une plus grande variabilité [107].

b) Facteur de genre

Les différences homme/femme constituent un facteur de risque important à la fois sur le risque de chute et aussi concernant les conséquences des chutes sur la santé des uns et des autres. La propension à chuter serait plus élevée chez la population féminine avec par exemple, pour le cas des chutes en intérieur (22%, 30%, et 48% pour les hommes, et 40%, 49% et 62% pour les femmes dans les tranches d'âges respectivement 18-44, 45-64, 65+) [108].

Les conséquences peuvent également être plus importantes chez les femmes. En effet, la ménopause est accompagnée de dérèglements hormonaux comme l'insuffisance en progestérone et en œstrogènes qui vont accélérer notamment la perte de densité osseuse et la prise de poids. Qui dit fragilité osseuse, dit risque de fractures. Le col du fémur, fragilisé par la baisse de densité osseuse peut dans certains cas se briser et conduire à la chute ou alors céder en conséquence d'une chute.

c) Comorbidités

Les comorbidités ou maladies chroniques viennent s'ajouter au processus de vieillissement classique et ainsi accélérer le déclin fonctionnel et la perte d'autonomie. Parmi les comorbidités les plus fréquentes on retrouve l'hypertension artérielle, les cardiopathies ischémiques, les accidents vasculaires cérébraux, les pathologies ostéoarticulaires, le diabète, les maladies broncho-pulmonaires et les cancers. Les personnes âgées de 65 à 79 ans déclarent avoir en moyenne 5 maladies et les femmes sont plus affectées que les hommes. Les plus âgés seraient moins affectés car les plus fragiles sont décédés avant eux. On peut ajouter certaines pathologies neurologiques à cette liste telles que les maladies de Parkinson et d'Alzheimer. Si ces maladies vont affecter les capacités motrices, sensorielles et cognitives, il faut également prendre en compte l'effet des médicaments associés dont les effets secondaires peuvent également entraîner des troubles [109]. Par exemple, la dopamine utilisée dans le traitement de la maladie de Parkinson, si elle est surdosée, ce qui peut arriver lorsque le malade utilise une pompe, peut provoquer des mouvements involontaires pouvant conduire à une chute. D'autres troubles peuvent également influencer négativement la performance motrice tels que les troubles du sommeil ou encore l'anxiété et la dépression.

d) Troubles de l'équilibre

Le vestibule, communément appelé oreille interne, donne des informations sur la position, les mouvements rectilignes et circulaires de la tête. Son fonctionnement à l'aide de liquide dans des canaux faisant bouger des cellules lors d'un mouvement peut être dérégulé. Dès lors, l'absence ou l'incohérence des informations transmises par le vestibule offrira moins de repères ou des repères faussés/contradictaires pour orienter son corps dans une tâche motrice. De plus, l'incohérence des informations, comparées à celles autres modalités sensorielles, pourra générer des malaises ou nausées, limitant aussi la capacité d'action d'un individu. Le vieillissement contribue également à l'altération du système vestibulaire avec la détérioration des cristaux de carbonate de calcium dans les organes otolithiques et aussi une réduction du nombre de cellules ciliées, fibres nerveuses, ganglions et noyaux neuronaux. De telles altérations vont par exemple conduire à une moindre efficacité du réflexe vestibulo-oculaire et donc à une moins bonne stabilisation optique ainsi qu'à une altération des réflexes vestibulo-spinaux permettant le contrôle de la tête et du tronc [110]. Des troubles proprioceptifs ou des atteintes du système nerveux central causés par un traumatisme ou une prise de médicaments peuvent aussi altérer les informations de ces systèmes et générer des troubles de l'équilibre.

e) Troubles de la marche

La plupart des modifications de la marche est due à des conditions médicales particulières et ne devrait pas être considérée comme une conséquence inévitable du vieillissement [111]. Toutefois, il semble que la marche soit d'abord influencée par l'âge (troubles de la marche chez 10% des 60-69 ans et plus de 60 % des plus de 80 ans [112]), la personnalité, l'humeur [113] ou encore le cadre sociodémographique où les citadins, de manière générale, marchent en moyenne plus vite que les personnes résidant à la campagne [114]. Les troubles de la marche regroupent des causes neurologiques affectant les systèmes sensoriels et/ou moteurs, des problèmes orthopédiques comme l'arthrose ou des difformités squelettiques, des conditions médicales particulières affectant les systèmes cardiaque, respiratoire, artériel ; ou encore l'obésité [113].

La vitesse de marche, premier indicateur de troubles, diminuerait d'un pourcent chaque année à partir de 60 ans. Une vitesse de marche inférieure à 1m/s serait considérée comme anormale [115, 116], inférieure à 0.8m/s associée à des capacités ambulatories limitées et inférieure à 0.4m/s témoignerait d'une incapacité à réaliser des activités quotidiennes [117]. Cette revue des causes potentielles de troubles de la marche témoigne de la nécessité de ne pas se pencher uniquement sur les causes motrices pour l'évaluation de la marche, mais bien sur l'ensemble des fonctions de l'individu et de leurs possibles altérations.

La marche a un statut particulier depuis quelques décennies, en effet, elle est plébiscitée de par sa simplicité, son accessibilité, le besoin restreint en matériel et elle semble correspondre aux recommandations d'activité physique dans la lutte notamment contre les maladies cardiovasculaires [118]. Par déclinaison, il a été envisagé que « l'activité » marche pourrait permettre également de réduire le risque de chute. Pourtant, des études montrent une augmentation du nombre de chutes entre 1981 et 2006 [12, 13]. Des bribes d'explication seraient notamment que la marche ne contribue pas outre mesure à réduire le risque de chute en comparaison avec d'autres activités. Une étude montre que des personnes âgées de plus de 75 ans ayant subi un programme d'activité physique incluant, entre autres, de la marche avaient un taux de chute légèrement inférieur à un groupe contrôle [119]. Cependant, une autre étude s'est penchée sur les effets de la marche rapide sur la masse et la densité osseuse chez des femmes ménopausées comparativement à un groupe contrôle. Le groupe contrôle montrait moins de chutes que les marcheuses [120]. Ce statut particulier de l'activité marche dans le risque de chute peut trouver une explication simple qui est l'exposition plus importantes aux contraintes environnementales et donc au risque de chute des marcheurs comparativement aux personnes plus sédentaires et

aux activités limitées [121]. Hypothèse en adéquation avec les études constatant une plus importante propension à chuter à l'extérieur [122, 123, 124].

La marche, lorsqu'elle est corrélée à un risque de chute plus élevé, se traduit par une variation de ses paramètres tels qu'une vitesse de marche réduite [125, 126] avec une nuance entre environnement intérieur et extérieur puisqu'une étude montre une relation en U entre la vitesse de marche et le risque de chute : le risque de chute est plus important avec une vitesse lente en intérieur et avec une vitesse rapide en extérieur. Une vitesse intermédiaire dans les deux environnements semble corrélée avec un moindre risque de chute [127]. Une vitesse réduite semble également corrélée à un risque de chute répétée, en plus du facteur de risque lié au nombre de chutes précédentes [29].

Pour les paramètres spatiaux, le nombre de pas augmenté pour faire un tour complet sur soi [128], une longueur de pas réduite et variable, une largeur de pas augmentée, sont également synonymes de risque de chute. Les variables temporelles telles que l'augmentation de la variabilité de la fréquence de pas ou l'augmentation temps de double appui par rapport au temps de simple appui constituent également des indicateurs récurrents [129, 130, 131, 132, 133].

f) Chutes répétées

La chute est déjà le symbole d'un déclin fonctionnel avec un défaut lors de la confrontation d'une personne avec ses capacités face à un environnement aux contraintes trop importantes à un moment précis. Les causes de cette première chute, associées à ses conséquences (blessures), vont devenir facteur de risque de chutes à répétition. Les circonstances de la chute répétée ne sont pas différentes de celles de la première chute ou chute unique [34]. Largement décrite comme l'entrée dans un cercle vicieux, la chute va auto-alimenter le risque de chuter à répétition (Figure 1).

Les chutes répétées sont caractérisées par le nombre d'événements survenant dans un intervalle de temps. Cet intervalle s'étale généralement de 6 à 12 mois. Un individu sera donc considéré comme chuteur à répétition s'il a effectué au moins 2 chutes dans l'année qui précède [34].

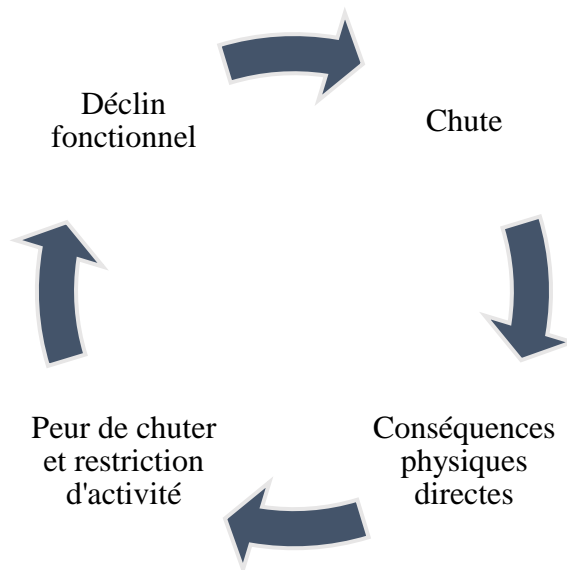


Figure 1 : Spirale inscrivant la première chute dans un processus de chutes répétées.

La HAS [34] propose une recherche intéressante des signes de gravité de la chute répétée au travers de 3 catégories qui sont les conséquences de la chute (traumatismes), les pathologies responsables de la chute (syncope liée à un trouble du rythme cardiaque [134]) et la récurrence (risque de récurrence et terrain à risque de chute grave).

g) Hypotension orthostatique

L'hypotension orthostatique est une baisse soudaine de la pression artérielle systolique à la suite du passage d'une position allongée à la position érigée. Les symptômes sont une sensation de malaise voire une perte de connaissance. L'hypotension orthostatique représente 15% des causes de syncope [135] et affecte environ 6% de la population. Elle est fréquente chez les personnes âgées ou les personnes atteintes de maladies neurodégénératives, diabète ou hypertension [136]. Les conséquences d'une hypotension orthostatique peuvent être à l'origine de troubles de l'équilibre au lever et conduire à la chute. La diminution de l'afflux sanguin au système nerveux central va également contribuer à diminuer les capacités à se rattraper en cas de chute. Maigre consolation s'il en est, la perte de connaissance permettra, en remettant le corps malgré lui à l'horizontale, de rééquilibrer les pressions.

h) Fragilité

La fragilité ne serait pas une maladie diagnosticable mais elle regrouperait cinq caractéristiques largement acceptées telles qu'une perte de poids, une fatigue fréquente, de

faibles niveaux d'activité, une démarche lente et une faible force de préhension [137, 138]. D'après Clegg *et al.* (2013), la personne fragile serait dès lors plus vulnérable à un même facteur de stress qu'une personne non fragile. La fragilité est un phénomène qui va affecter les mêmes systèmes tels que la physiologie, la neurologie, le système endocrinien, le système immunitaire, les muscles squelettiques [139].

2.1.6. Les tests et échelles pour l'évaluation du contrôle moteur (risque de chute, équilibre, tonus musculaire...) à destination notamment des personnes âgées

Les conséquences du vieillissement associées aux facteurs de risque de chute constituent un ensemble « pouvant » conduire, dans un contexte particulier, à une chute. Cette potentialité nécessite d'être évaluée, quantifiée, objectivée, afin de permettre aux praticiens de santé de prendre des décisions sur les soins à apporter.

Conçus pour fournir un indice sur la propension à chuter d'une personne dans un avenir plus ou moins proche, les tests et échelles offrent un moyen relativement simple à mettre en œuvre et à interpréter qui permet d'orienter vers des tests supplémentaires voire directement vers une prise en charge adaptée. Si l'HAS recommande de poser la question « êtes-vous tombé cette année ? » voyant la chute comme un premier facteur de risque de chute (chutes répétées), elle recommande de poursuivre avec un test sur le risque de chute [140]. Il en existe de nombreux parmi lesquels on retrouve tout de même des gold standards, plus largement utilisés. La liste suivante est non exhaustive, elle regroupe des tests parmi les plus connus et témoigne de la variabilité des paramètres qui peuvent être évalués ou encore des populations qu'ils vont mettre à l'épreuve. Il faut savoir en effet que les différentes pathologies pouvant affecter les sujets vont modifier les seuils de référence de ces tests et ces derniers doivent être réévalués avec la population spécifique en question. Ainsi, il est très fréquent de retrouver des articles testant la fiabilité et la validité de ces tests pour, par exemple, des personnes atteintes de la maladie de Parkinson, d'autres ayant subi un AVC, des patients atteints de démence, des personnes dépendantes placées en institution...

a) (Get) Up and Go

Le test Get-Up and Go proposé par Mathias *et al.* en 1986 [141] propose un test réalisable en moins d'une minute avec une cotation simple sur 5 points. Le participant est assis confortablement sur une chaise à accoudoirs, on lui demande de se lever, de rester debout quelques instants, il doit ensuite marcher 3 mètres, faire demi-tour et retourner s'asseoir sur la chaise.

La cotation s'organise comme suit :

- 1 : aucune instabilité
- 2 : très légèrement anormal (lenteur d'exécution)
- 3 : moyennement anormal (hésitations, mouvements compensateurs des membres supérieurs et du tronc)
- 4 : anormal (le patient trébuche)
- 5 : très anormal (risque permanent de chute) [140]

Cette évaluation se base notamment sur l'œil de l'expert qui va juger la performance motrice du participant, la difficulté étant d'avoir une variabilité inter-observateur suffisamment faible pour pouvoir conclure sur un éventuel risque. Si la tâche peut sembler plutôt intéressante par la réalisation fréquente des différentes actions dans la vie quotidienne, l'échelle pourrait peut-être être plus fine. On trouve notamment des adaptations faites par les médecins de centres de réadaptation et utilisées par la structure en question. Ces adaptations proposent par exemple d'évaluer chaque action avec des critères sur l'usage des accoudoirs, l'élévation des pieds et le chevauchement des pieds durant la marche, le nombre de pas et l'instabilité lors du demi-tour etc. qu'on retrouve notamment dans le test de Tinetti [130]. De telles adaptations témoignent d'un besoin de terrain et à plus grande échelle et la nécessité d'uniformiser ce qui est proposé pour permettre des comparaisons ayant du sens en dépit de la variabilité inter-observateur qu'il va y avoir au sein d'un même centre.

b) Timed Up and Go

Proposé par Podsiadlo et Richardson en 1991 [142], le Timed Up and Go (Figure 2) est la version simplement chronométrée du Get-Up and Go de Mathias *et al.* en 1986 [141]. Il y aurait effectivement une corrélation entre le temps d'exécution du test et le niveau de risque de chute. Le temps d'exécution a alors été comparé aux résultats de l'échelle de Berg [143, 144], de la vitesse de marche sur une période 15m sur 20m de marche et de la capacité fonctionnelle avec le l'index ADL (activities daily living) de Barthel [145]. Les auteurs proposent l'utilisation de l'aide habituelle à la marche et un chronométrage à la seconde près, une montre à trotteuse suffit. Si l'accent est mis sur la simplicité de mise en œuvre, de passation et d'interprétation avec un seuil temporel au-delà duquel on peut considérer une personne comme potentiellement à risque de chute, on remarque tout de même quelques imprécisions laissées à la libre interprétation des utilisateurs souhaitant utiliser le test. Par exemple, il est dit que la personne doit se lever puis marcher jusqu'à une ligne située à 3 mètres. Une libre interprétation peut être

faite par exemple sur la distance des 3 mètres. A partir de quoi dois-je mesurer ? Les pieds du participant, les pieds de la chaise, le centre de gravité du participant ? Où doit-il faire demi-tour exactement ? juste avant la ligne, sur la ligne, juste derrière la ligne ? Autant de questions peuvent drastiquement moduler la distance à parcourir et donc fausser les interprétations découlant du test.

Qu'en est-il du temps seuil ? Les auteurs ont divisé leur population en 3 groupes en fonction du temps à l'Up and Go et ont constaté que les plus rapides (<20s) étaient relativement indépendants pour les transferts (ex : baignoire/douche) tandis que les moins rapides (>30s) étaient les plus dépendants et avaient besoin d'aide pour aller aux toilettes ou dans la baignoire. Les auteurs ont arbitrairement choisi les paliers à 20 et 30 secondes avec une population ayant effectué un séjour en service de gériatrie à l'hôpital. Ces seuils n'apportent pas grand-chose à un médecin souhaitant évaluer un patient. De nombreuses études rapportent différents seuils, calculés selon les meilleurs scores de sensibilité et de spécificité obtenus en comparant le temps au taux de chute sur une période consécutive définie. Toutefois, beaucoup de ces articles ont une population soit spécifique, soit limitée en nombre, limitant ainsi l'exploitabilité du seuil de temps établi. Une revue de littérature proposée par Barry *et al.* en 2014 [146] incluant 25 et 10 études ont révélé que le seuil de 13.5s qu'on retrouve régulièrement (ou proche : 12.4s pour Alexandre *et al.* en 2012 [147] ; environ 14s avec une relation non linéaire entre le temps et le taux de chutes pour Shumway-cook *et al.* en 2000 [148]) avait une spécificité de 74 % pour une sensibilité de 31% seulement. Les auteurs concluent, en s'appuyant sur une analyse de régression logistique, que le TUG n'est pas un prédicateur significatif des chutes. Les conclusions des différents auteurs divergent donc et s'appliquent souvent à la population étudiée, là où Podsiadlo et Richardson ont inclus une population à large spectre de pathologies neurologiques, il est normal qu'ils utilisent un seuil élevé (30s), tandis que sur un éventail de personnes âgées sans comorbidités, le seuil peut facilement être abaissé dans une fourchette large comprise entre 10 et 15 secondes.



Figure 2 : Chronophotographie du test Timed Up and Go.

De même que pour le test Get-up and Go, le Timed Up and Go a pu subir des adaptations dans certains papiers, on peut donc par exemple retrouver des tests sur 10 mètres au lieu de 3 ou encore l'ajout d'une tâche cognitive. A savoir qu'il est toujours possible d'inclure les observables du Get-up and Go dans l'analyse globale. En effet, les médecins rééducateurs et kinésithérapeutes se servent du Timed Up and Go comme d'un prétexte pour l'exécution d'une tâche locomotrice comprenant un lever et une assise sur une chaise ainsi qu'un demi-tour. Cette tâche, à l'instar du Get Up and Go permettra de déceler des particularités à risque dans la marche, le demi-tour ou encore le lever/assise telles que des instabilités, des pas trop rasants, un déséquilibre ou un manque de fluidité à l'exécution du demi-tour, un manque de tonus musculaire pour le lever et l'assise ou encore une hypotension orthostatique.

Il est possible également d'effectuer le test en double tâche et demander de partager l'attention entre le Timed Up and Go et une tâche cognitive ou motrice. En effet, il peut être demandé au participant d'effectuer une tâche de calcul mental à l'exécution du test, classiquement on demande à la personne de compter à rebours, par exemple de 7 en 7 à partir de 100. L'attention peut être partagée non plus avec une tâche cognitive mais plutôt une tâche motrice comme tenir un verre d'eau sans le renverser. Une telle tâche est susceptible de moduler le Timed Up and Go pas seulement pour une question d'attention mais par l'adoption d'un comportement moteur dépendant du fait de tenir quelque chose qui doit conserver son orientation et une certaine stabilité. Pour le cas d'une personne ayant besoin des accoudoirs pour se lever de la chaise, avoir une main prise peut rendre l'action de se lever dissymétrique.

Une personne qui aurait besoin de se donner de l'élan vers l'avant pour se lever, serait contrainte de réduire la brutalité de son mouvement pour ne pas renverser d'eau et donc de compenser par un effort musculaire supérieur. Il n'est alors plus possible de balancer les bras, de manière symétrique du moins, lors des phases de marche. On basculera alors vers une gestion différente de l'équilibre dynamique.

c) Test de Tinetti

Le test de Tinetti [130], aussi connu sous le nom de POMA pour Performance Oriented Mobility Assessment, est également un test largement utilisé dans le domaine de l'évaluation du risque de chute, il se passe en environ 5 min et donne un score sur 28 points, 28 étant le score de normalité. L'interprétation se fait comme ceci :

- < 20 pts : risque de chute très élevé
- Entre 20 et 23 pts : risque de chute élevé
- Entre 24 et 27 pts : risque de chute peu élevé
- 28 pts : normal

Le test s'organise autour de 6 items dont 5 se retrouvent dans le Get Up and Go et par déclinaison dans le Timed Up and go, à savoir : être assis sur une chaise, se lever, marcher, faire un pivot (360° ici), s'asseoir. La 6^{ème} tâche est le maintien de l'équilibre à la suite d'une poussée sternale. Le score global peut être divisé selon deux catégories : équilibre (15pts) et marche (13pts) (Tableau 1).

Tableau 1 : Paramètres analysés lors du test de Tinetti [130]

Balance and Gait Evaluations

Balance Maneuvers	Gait Observations
Sitting balance*	Initiation of gait***
Rising from a chair**	Step length***
Immediate standing balance (first five seconds)***	Step height (? foot clears floor)***
Prolonged standing balance***	Step continuity***
Withstanding nudge on chest***	Step symmetry*
Standing balance with eyes closed*	Walking stance*
Turning balance (360-degree)***	Amount of trunk sway*
Sitting down*	Path deviation***

* Scored 0 to 1.
 ** Scored 0 to 4.
 *** Scored 0, 1, or 2.

La notation des actions sur des échelles à 2 ou 3 niveaux peut manquer de finesse, toutefois, ceci peut permettre une moindre différence inter-évaluateur. Globalement, le score sur 3 niveaux s'organise selon « ne fait pas », « fait, mais... », « fait sans difficulté ». Par conséquent, ce test semble plus adapté à une population avec des problèmes moteurs bien visibles.

d) Echelle d'équilibre de Berg

Le développement de l'échelle d'équilibre de Berg [143, 144] a consisté à associer une longue liste d'observables de l'équilibre lors de tâches motrices puis de réduire cette liste aux 14 items les plus pertinents (selon l'avis des experts et les résultats statistiques). Chacun scoré de 0 à 4, l'association de ces 14 items va donner un score maximal de 56. Dans le détail, un score entre 41 et 56 reflète une personne indépendante, de 21 à 40 une personne marchant avec une assistance et de 0 à 20 une personne contrainte à un fauteuil roulant. Un score inférieur à 45 reflète un risque de chute élevé. Il est demandé à l'évaluateur de coter à la moins bonne performance.

Exemple de cotation d'un item :

- Se lever d'une chaise (« Levez-vous en essayant de ne pas vous servir des mains ») :
 - 4 Capable de se lever sans utiliser les mains et se stabilise seul
 - 3 Capable de se lever avec les mains
 - 2 Capable de se lever en utilisant les mains après plusieurs essais
 - 1 A besoin d'une aide minimale pour se lever ou se stabiliser
 - 0 A besoin d'une assistance modérée ou maximale pour se lever

Cette échelle sur 5 niveaux permet aux différents items de se compenser mutuellement et d'offrir des observables à la fois subtiles et néanmoins identifiables, laissant ainsi peu de variabilité inter-évaluateurs.

e) Equilibre unipodal

Le test d'équilibre unipodal consiste à demander à la personne de se maintenir sur un pied, l'objectif est alors de garder son équilibre durant minimum 5 secondes en deçà desquelles le test est considéré comme anormal et prédictif d'un très haut risque de chute. Au-delà de 30 secondes, il est prédictif d'un très faible risque de chute. A considérer également qu'un tel test est difficile à réaliser pour une personne âgée et quasiment impossible à partir de 80 ans, car il génère de l'anxiété. Ce test d'équilibre aurait une sensibilité de 37% et une spécificité de 76%

pour des populations majoritairement hospitalisées ou institutionnalisées [149]. Ce test semble également peu discriminant dans l'évaluation d'un risque de chute répétée [150]. Le test, passé tantôt du côté dominant, tantôt de l'autre, montre des sensibilités et spécificités de 61%-49% (dominant) et de 46%-65% (non dominant) [151], l'asymétrie est également constatée par d'autres auteurs suggérant que le côté dominant doit impérativement être pris en compte dans l'évaluation et l'équilibre unipodal devrait être considéré comme une tâche dynamique plutôt que statique [152]. Le test serait amélioré les yeux fermés ou en changeant la position des bras dans les 5 premières secondes [151].

Le test d'appui unipodal a également donné lieu à des analyses métrologiques comme les ajustements posturaux anticipés chez le Parkinsonien (avec et sans Freezing of Gait) à l'aide de centrales inertielles placées sur le tronc et le tibia [153] ; une étude évaluant la possibilité d'utiliser Kinect pour l'analyse du mouvement chez des patients avec des troubles au niveau des hanches [154] ; ou encore l'analyse du centre de pression et de l'activation neuromusculaire pour déterminer un effet d'âge sur le contrôle postural sur un pied [155].

f) Test de poussée sternale

Le test de poussée sternale [156], qu'on retrouve comme composante du test de Tinetti, consiste, comme son nom l'indique, à effectuer une légère poussée au niveau du sternum d'un individu pour voir s'il en résulte un déséquilibre. Il s'agit donc de l'évaluation de la réponse motrice à une perturbation d'origine externe. À la suite d'une telle perturbation, on peut classer les individus selon leur réponse. Une simple oscillation du corps, stabilisée grâce à l'action des muscles posturaux témoignerait de l'absence de risque de chute, quelques pas en arrière permettant de se rattraper témoignent d'un faible risque de chute et aucun ajustement suivi d'une chute témoigne d'un haut risque de chute. Il existe une variante nommée test de Weiner qui consiste à compter le nombre de pas réalisés vers l'arrière pour se rattraper [157]. La HAS [149], sans citer sa source dans son document, affirme que le test de poussée sternale aurait une sensibilité de 38% et une spécificité de 94%.

Une difficulté se pose naturellement à la réalisation de ce type de test : quelle force faut-il appliquer ? Il est dit d'appliquer une force « légère » sans plus de précision. Il est à noter que le moment de force dépend à la fois de la force appliquée ainsi que de la distance de son point d'application par rapport à l'axe de rotation (au niveau des chevilles, des talons ?). Ceci implique-t-il qu'il faudrait moduler cette force en fonction de la taille des sujets, de leur corpulence ?

g) BEStest

Le Balance Evaluation Systems Test (BESTest) de Horak *et al.* en 2009 [158] est un test d'évaluation de l'équilibre constitué de six groupes dans lesquels on trouve 27 tâches dont certaines sont constituées de 2 à 4 sous-items pour un total de 36 items (Tableau 2) :

Tableau 2 : Groupes et items du BESTest [158]

Biomechanical constraints	Stability Limits/Verticality	Anticipatory Postural Adjustments	Postural Responses	Sensory Orientation	Stability in gait
Base of support	Sitting verticality (left and right) and lateral lean (left and right)	Sit to stand	In-place response, forward	Modified Clinical Test of Sensory Integration for Balance [159]	Gait, level surface
Center of Mass alignment	Functional reach forward	Rise to toes	In-place response, backward	Incline, eyes closed	Change in gait speed
Ankle strength and range of motion	Functional reach lateral (left and right)	Stand on one leg (left and right)	Compensatory stepping correction, backward		Walk with head turns, horizontal
Hip/trunk lateral strength		Alternate stair touching	Compensatory stepping correction, lateral (left and right)		Walk with pivot turns
Sit on floor and stand up		Standing arm raise			Step over obstacles
					Timed « Get Up & Go » test
					Timed « Get Up & Go » test with dual task

La cotation de chaque item se fait selon un score de 0 à 3, 0 étant la moins bonne performance et 3 la meilleure. Le score final est lui un pourcentage sur le total des points. Un tel test peut prendre jusqu'à 40 minutes pour être conduit auprès de patients atteints de la maladie de Parkinson et plus encore dans le cas de pathologies plus sévères. Il peut également nécessiter du matériel spécifique telle qu'une mousse pour réaliser les tâches du Clinical Test of Sensory Integration for Balance ou encore des poids pour la tâche « Standing arm raise » [160].

Pour rendre le BESTest plus facilement utilisable dans le domaine médical, une équipe de recherche a travaillé à limiter le test à ses items les plus pertinents auprès d'une cohorte de 115 patients atteints de diverses pathologies neurologiques pour créer le mini-BESTest. Ce mini-BESTest contient 24 des 36 items originaux dans 4 des 6 groupes initiaux et score sur 3 points [161, 162].

Les critiques des BESTest, trop long, et mini-BESTest, efficace pour l'évaluation du risque de chute à 6 mais pas à 12 mois et parfois incohérent avec le BESTest [160], ont conduit à une autre déclinaison : le Brief-BESTest. Le Brief-BESTest se contente alors des 8 items suivants :

Hip/trunk lateral strength, functional reach forward, single leg stance (left and right), compensatory stepping correction lateral (left and right), standing with eyes closed on foam and the Timed « Get Up & Go » test [163].

h) Echelle de Morse

L'échelle de Morse propose l'évaluation de facteurs de risques sur un score maximum de 125 points, (Tableau 3) [164]. Les auteurs ne se prononcent pas quant à un seuil de risque de chute.

Tableau 3 : Echelle de Morse

Factor		Score
History of falling	no	0
		25
Secondary Diagnosis	no	0
	yes	15
Ambulatory aid	none/bedrest/nurse assist	0
	crutches/cane/walker	15
	furniture	30
Intravenous therapy/Heparin Lock	no	0
	yes	20
Gait	normal/bedrest/wheelchair	0
	weak	10
	impaired	20
Mental status	oriented to own ability	0
	overestimates/forgers' limitations	15

Un paramètre important est évalué dans ce test sur un versant psychologique, c'est l'estimation que fait un sujet de ses propres capacités motrices. En effet, au-delà de sa motricité pure, le test va prendre en compte si une personne est susceptible de prendre des risques en surestimant ses capacités à faire face à une situation et potentiellement se mettre en danger.

i) Test de Fukuda

Ce test montre les déviations et déplacement du corps lors d'une tâche de piétinement (x50) avec les bras à l'horizontale vers l'avant. Il est une modification et amélioration du Tretversuch de Unterberger (1938) [165] et du Waltzing test de Hirsch (1940) [166]. Ces derniers montrent qu'un défaut au niveau du système vestibulaire va entraîner une rotation, ce que l'on ne retrouve pas dans le cas d'un vestibule sain, sauf si la durée et le nombre de piétinements augmentent. On observe ainsi une rotation à gauche pour les droitiers et à droite

pour des gauchers. En plus de la rotation, le Fukuda s'intéresse également à l'angle et à la distance de déplacement [167].

j) Test de marche de 6 minutes

Proposé par Butland *et al.* en 1982 [168], le test de marche de 6 minutes est un dérivé du test de Cooper (1968) [169], test de tolérance à l'exercice avec un test de marche de 12 minutes. Pour tester une tolérance à l'exercice, il semble que la durée de test, qu'elle soit de 2, 6 ou 12 minutes importe peu car les sujets trouvent rapidement un rythme de croisière. Toutefois, le test sur 12 minutes peut être trop long pour une population aux capacités diminuées.

Concernant les résultats d'un tel test, ils dépendent de la distance parcourue en 6 minutes. Les documents présentant une norme quant au risque de chute sont essentiellement des tests édités par des centres de réadaptation et ne sont pour la plupart pas référencés. C'est pourquoi les normes suivantes s'appliquent à une population saine âgée de 50 à 85 ans et montrent une distance parcourue par les participants à cette étude de $631 \pm 93\text{m}$, les hommes ont parcouru une distance supérieure de 84m par rapport aux femmes. Des différences peuvent être observées chez les personnes de plus de 50 ans et dépendre de l'âge, de la taille, du poids et du sexe.

k) Cinq assis et relevés de chaise

Témoin du tonus musculaire au niveau des membres inférieurs, ce test à 5 répétitions [170] est une déclinaison du Sit to Stand test proposé par Csuka et McCarty en 1985 (10 répétitions) [171]. Ce test est chronométré et propose différents seuils. Bohannon (2006) suggère, selon l'âge, que des temps supérieurs à 11.4s (60 à 69 ans), 12.6s (70 à 79 ans) et 14.8s (80 à 89 ans) témoignent d'une performance en dessous de la moyenne. Quelques points pourraient mériter d'être standardisés pour harmoniser les différentes études tels que la hauteur de l'assise ou encore l'arrêt du chronomètre lorsque la personne s'est levée pour la 5^{ème} fois, puisqu'il s'agit d'un test de force musculaire [172].

l) Dynamic Gait Index

D'abord proposé par Shumway-Cook et Woollacott en 1995 [173], le DGI (Dynamic Gait Index) consiste à évaluer la capacité d'une personne à adapter sa marche à des tâches plus complexes fréquemment rencontrées dans la vie quotidienne [174]. Dans sa version originale, les tâches demandées consistent en une marche simple (condition contrôle) et les autres viennent ajouter une complexité comme un changement de la vitesse de marche, un changement de direction (pivot, orientation de la tête en horizontal et vertical), une montée de marches, le

franchissement ou contournement d'obstacles [175]. Ces tâches sont évaluées sur trois critères qui sont le niveau d'assistance, le pattern de marche et le temps.

Une version modifiée (mDGI) va améliorer l'attribution des scores dans les trois critères existants et les propriétés psychométriques du test permettraient une utilisation aussi bien dans des thématiques cliniques que de recherche [176].

Les DGI et mDGI s'attachent à simuler des conditions proches de la vie courante et le DGI pourrait notamment être amélioré en implémentant de nouvelles conditions comme suggéré par Patla et Shumway-Cook (1998). Les personnes bénéficieraient d'une évaluation portant également sur la distance de marche (400 m), l'ambiance (luminosité et conditions climatiques), l'attention (multi-tâches) et la charge physique (poussée ou port de charges statiques ou dynamiques) [175, 177].

m) Bilan des tests

Les tests sélectionnés ici reflètent à la fois une voie d'exploration particulièrement ancrée autour des capacités motrices et du comportement moteur qui en résulte, signe qu'ils comptent des paramètres indispensables à l'évaluation d'un risque de chute. Mais ils montrent aussi qu'ils pourraient gagner en précision avec l'inclusion de conditions plus proches de la vie courante pour évaluer aussi les stratégies d'adaptation. On remarque à l'étude de ces différents tests et échelles qu'il y a des besoins différents selon le domaine d'application clinique ou recherche. Ainsi, les praticiens de santé, pour les évaluations que l'on qualifiera de généralistes, ont besoin de tests à la fois simples à mettre en œuvre et rapides, mais aussi simples à interpréter. Des cliniciens plus spécialisés ayant besoin d'une analyse détaillée se tourneront soit vers des tests plus complets ou une batterie de tests complémentaires, ou alors ils opteront pour des solutions à la fois plus complexes et plus coûteuses au niveau matériel mais aussi en temps et main d'œuvre. Ces méthodes d'évaluation utilisent du matériel de métrologie pour réaliser par exemple une analyse quantifiée de la marche (AQM), ou une analyse posturographique.

Les tests et échelles cliniques forment une base intéressante pour la conception d'une nouvelle méthode d'évaluation du risque de chute. Les tâches et critères d'évaluation qu'ils regroupent permettent d'entrevoir le format que devrait adopter cette nouvelle méthode en proposant une évaluation sensori-motrice, cognitive, stratégique, physiologique et psychologique du risque de chute tout en proposant des situations au plus proche de la vie courante.

2.2. Introduction d'une nouvelle technologie au service du risque de chute : la Réalité Virtuelle

La réalité virtuelle, apparaissant comme récente pour le grand public, mais éprouvée dans le domaine de la recherche, offre un potentiel certain dont l'évaluation du risque de chute pourrait faire l'emploi. Cette partie s'attache à décrire ce potentiel mais aussi ses limites en proposant une vision à la fois historique, actuelle et future de la réalité virtuelle, car il apparaît indispensable de consigner les capacités d'une telle technique pour pouvoir l'utiliser de manière pertinente.

Philippe Fuchs, professeur à Mines ParisTech est un expert en réalité virtuelle qui a publié plusieurs ouvrages sur le sujet depuis 2000 et les derniers proposent à la fois une vision actuelle de la réalité virtuelle et une comparaison intéressante avec les premiers systèmes apparus dans les années 1960.

2.2.1. Définition

Le terme « réalité virtuelle » est un oxymore qui vient de l'expression anglaise « virtual reality » introduit dans les années 80 aux Etats Unis par Jaron Lanier (essayiste et chercheur en informatique américain). « Virtual » signifiant plutôt « de fait » ou « pratiquement », il conviendrait mieux de traduire « virtual reality » par « réalité vicariante » ou « environnement vicariant » (Vicariant adj. : « Qui remplace quelque chose d'autre. » *Larousse*). Il n'existerait pas de définition de la réalité virtuelle faisant consensus tant elles sont des tentatives de raccrocher à l'utilisation qu'en fait chaque auteur selon la branche à laquelle il appartient (technique, informatique etc.). Attention également à ne pas réduire la réalité virtuelle à une technologie comme le font généralement les entreprises qui en fabriquent, en commercialisent ou les revues qui en parlent, limitant alors la réalité virtuelle à un visiocasque.

Fuchs en 1996 propose une finalité de la réalité virtuelle :

« La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité **sensori-motrice** dans un monde artificiel, qui est soit imaginaire, soit symbolique, soit une simulation de certains aspects du monde réel. » [178]

Arnaldi en 2003 propose une définition technique de la réalité virtuelle :

« La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. » [179]

Il y aurait deux termes autour desquels les chercheurs se retrouvent : l'immersion et l'interaction où, synthétiquement, l'immersion doit être pseudo-naturelle et la plus efficace possible et l'interaction doit se faire en temps réel [180].

L'approche anthropocentrique proposée par Fuchs met l'utilisateur au centre du système car l'application virtuelle lui est adressée. L'utilisateur s'interface alors avec l'environnement virtuel de manière sensorielle (perception des forces sur les muscles, ouïe, vue, toucher, goût, odorat, kinesthésie) et motrice (muscles). La boucle sensori-motrice qui existe entre l'application virtuelle et l'utilisateur doit être peu perturbée par les latences et incohérences [181].

a) Immersion

Selon Mel Slater en 2003, l'immersion serait la capacité du système à isoler l'utilisateur du monde réel [182].

L'immersion ou le caractère immersif d'une expérience en réalité virtuelle va être catégorisé selon trois niveaux, à savoir non-immersif, semi-immersif et immersif. Par exemple, la réalité virtuelle non-immersive consiste à contrôler un personnage qui va interagir avec l'environnement virtuel mais l'utilisateur n'est pas directement en interaction, il interagit par le biais de son personnage. Souvent, cela se fait comme pour les jeux vidéo classiques par l'intermédiaire d'un écran et d'un dispositif de contrôle (manette, clavier + souris, télécommande...). Une expérience virtuelle sera dite semi-immersive si le dispositif d'affichage occupe une zone plus importante renforçant le sentiment d'être physiquement présent dans l'environnement virtuel. Ce sera par exemple le cas d'un simple casque fonctionnant avec un smartphone. Si l'utilisateur est bien au centre de l'expérience, il est toutefois limité dans ses interactions comme des déplacements. En effet, si l'affichage dans un casque fonctionnant avec un smartphone permet notamment une visualisation à 360°, il n'a toutefois pas la possibilité de se déplacer physiquement dans l'environnement virtuel, de plus, les interactions se feront uniquement avec une manette simplement orientée dans l'espace. Dans

le cas d'un CAVE (Cave Automatic Virtual Environment), c'est essentiellement la zone d'exploration visuelle et physique ($\neq 360^\circ$) qui va limiter l'immersion.

Pour une expérience pleinement immersive, il est nécessaire d'ajouter à l'exploration visuelle à 360° une pléiade de capteurs qui vont approfondir l'analyse de la motricité de l'utilisateur pour fournir en retour des informations plus nombreuses et plus précises. En effet, l'immersion est améliorée par la stimulation cohérente de plusieurs modalités sensorielles ou encore par le degré d'isolement du monde extérieur, qui va également améliorer le sentiment de présence.

b) Interaction

Interagir avec un environnement virtuel peut passer par des actions très simples ou très complexes. Elles sont complexes, non pas d'un point de vue motricité humaine mais plutôt du point de vue de l'intégration de cette motricité dans le virtuel. L'interaction va consister en une succession de réactions mutuelles entre l'utilisateur et l'environnement numérisé. C'est-à-dire que les informations (visuelles, auditives, haptique etc.) générées par l'ordinateur vont permettre à l'utilisateur de comprendre l'état de son environnement virtuel à chaque instant. Ce dernier pourra alors agir dans/sur cet environnement avec une conséquence sur cet environnement, qui sera retranscrite par les modules d'affichage, sonores, de retour haptiques... à l'utilisateur.

Le niveau d'interactivité va donc dépendre à la fois du matériel utilisé mais aussi des interactions qui ont fait l'objet d'une programmation et un haut niveau d'interactivité peut favoriser l'immersion. Lorsque Philippe Fuchs explique qu'il est naïf de chercher à créer un monde virtuel identique au monde réel, il est surtout très compliqué techniquement à reproduire, notamment au niveau des interactions. On va se contenter, à dessein ou non, d'interactions pseudo-naturelles et, dans une expérience immersive, on devra tout de même limiter certains types d'interactions à ce qu'il est possible d'analyser et de comprendre du point de vue de l'ordinateur. Autrement dit, si certains mouvements globaux tels que des déplacements sont facilement identifiables par l'ordinateur, d'autres mouvements, en lien avec la motricité fine par exemple, sont plus complexes à analyser mais aussi à utiliser avec l'environnement virtuel car il risque de manquer des réactions cohérentes. Philippe Fuchs fait un parallèle avec les travaux de Piaget [183] sur les schèmes. Un schème étant l'organisation mentale d'une action qui peut se généraliser ou se transférer lors de la répétition dans des circonstances similaires.

Les technologies de réalité virtuelle telles que les visiocasques vont permettre d'utiliser simplement le schème qui consiste à changer de point de vue en tournant la tête, ce qu'on serait

contraint de faire différemment avec un simple écran. Avec les dispositifs grand public actuels, on utilisera les schèmes dans diverses interactions comme des déplacements, des rotations, approcher la main d'une cible pour la saisir. Si cela fonctionne plutôt bien d'un point de vue technologique, des difficultés vont apparaître notamment pour les mouvements plus fins. On aura donc l'usage d'un schème, naturel, pour la phase d'approche de la main vers l'objet, mais on utilisera plutôt une métaphore pour la saisie de l'objet virtuel.

La métaphore a pour objectif de combler les lacunes de ces technologies et de décomplexifier à la fois l'interaction elle-même mais aussi la programmation. Il se trouve que l'absence de retour de force lorsqu'on sert les doigts autour d'un objet virtuel qui n'existe pas physiquement complexifie logiquement la saisie. La métaphore est alors un moyen détourné d'effectuer une action. De la même manière qu'on appuie sur un bouton avec un doigt pour accélérer un véhicule virtuel lorsqu'on n'a pas de volant et de pédalier, on va utiliser un moyen d'interagir certes moins naturel, mais plus simple à mettre en œuvre en virtuel. On peut retrouver par exemple, si les mouvements ou les configurations de la main et des doigts sont reconnus, l'action de fermer le poing pour attraper, l'action de balayer pour faire défiler, l'action de fermer le poing et de le bouger pour déplacer un objet saisi etc. De toute évidence, une manière d'interagir peut s'apprendre, les joueurs de jeux vidéo, s'ils jouent sur console avec une manette ou sur PC avec un clavier et une souris seront quelque peu déroutés s'ils échangent leurs supports de jeu de prédilection respectifs. Philippe Fuchs évoque une étude sur les déplacements en supermarché où il aura été plus naturel aux utilisateurs de pousser un chariot plutôt qu'utiliser un joystick, là où peut-être que la proportion de joueurs actuelle serait tout aussi à l'aise avec un joystick [180]. La métaphore peut donc être suffisamment parlante ou familière pour n'influencer que faiblement les interactions.

Il existe des primitives comportementales virtuelles (PCV) selon 4 catégories :

- Observer le monde virtuel
- Se déplacer dans le monde virtuel
- Agir sur le monde virtuel
- Communiquer avec autrui ou avec l'application

La cohérence des interactions dans ces quatre catégories va favoriser l'immersion et aussi améliorer le sentiment de présence [180, 184].

c) Notion de Présence

La présence serait l'effet de l'immersion dans l'environnement virtuel sur le comportement d'un individu [179]. Un sentiment de présence accru grâce à un haut niveau d'immersion favoriserait le détournement de l'attention de l'utilisateur vers l'environnement virtuel dans lequel il est immergé plutôt que l'environnement réel [179, 185]. Cette notion de présence est plus détaillée dans le paragraphe 2.2.9 (p.57).

2.2.2. La réalité virtuelle dans la littérature scientifique

La constante évolution technologique et plus particulièrement la puissance de calcul a permis au fil des années une avancée importante dans le monde vidéoludique. L'essor des jeux vidéo sur ordinateur et consoles de salon ont permis le développement d'une industrie créative d'une grande richesse, donnant ainsi aux joueurs du monde entier accès à des technologies avancées et des innovations aux usages variés. L'accès du grand public à ces technologies d'abord réservées aux laboratoires a facilité leur accès aux équipes de recherche également. C'est en partie pour ces raisons de coût qu'on trouve de nombreux articles scientifiques utilisant des consoles, des accessoires de jeux détournés pour des applications de recherche.

a) Génération Wii et Kinect

En 2006, Nintendo sort une nouvelle console de jeux : la Wii (Figure 3). La révolution promise par cette console vendue aux alentours de 250 € réside dans le type d'interactions avec l'environnement virtuel. En effet, contrairement aux consoles classiques (dans leurs versions de base) qui proposent d'interagir avec une manette ou un clavier, la Wii propose en plus le mouvement des manettes avec notamment un tracking externe infrarouge. La majeure partie du catalogue de jeu proposé par Nintendo utilise ce type d'interactions qui va trouver un large public. Sony sortira une manette Sixaxis pour sa PlayStation 3 en 2006 également. Elle permet une reconnaissance des mouvements (rotations) en tracking interne cette fois, mais l'utilisation qui en est faite dans les jeux reste anecdotique.

La Wii trouve ses joueurs et développe une série d'accessoires intéressants parmi lesquels le plus notable est la Wii Balance Board (WBB, Figure 3), commercialisée à partir de 2007 pour un peu moins d'une centaine d'euros. La WBB est une plateforme de force à faible coût, économie d'échelle et grand public oblige, sur laquelle le joueur monte, le plus souvent debout. Elle s'accompagne de jeux dans lesquels le joueur doit déplacer la projection de son centre de gravité et moduler les forces appliquées à la plateforme pour interagir avec l'environnement virtuel. On retrouve, pour ne citer que lui, un jeu de saut à ski où le joueur doit se propulser

(sans sauter) puis équilibrer l'avatar durant le vol en se penchant sur un côté ou l'autre de la WBB.

Quant à Microsoft, ils commercialisent en 2005 la Xbox 360, qui ne revendique certes pas les mêmes intentions que Nintendo alors seul en scène sur cette manière de jouer. Toutefois, ils tentent d'accéder à ce marché d'une nouvelle façon d'interagir en proposant en 2010 Kinect (Figure 3) pour environ 150 euros, ajoutant, de fait, à son catalogue, des jeux dédiés au périphérique. Kinect est un système de reconnaissance de mouvements avec une caméra infrarouge. Les interactions reposent alors sur l'utilisation de la silhouette retranscrite à l'écran, le joueur bénéficie d'un retour visuel en direct de son corps (comme avec un miroir) sur les différents menus notamment où il interagit en superposant la main de sa silhouette à un bouton virtuel apparaissant à l'écran.

Sony tentera également de se faire une place en sortant le PS Move (Figure 3) utilisant une caméra et des manettes spécifiques, s'inspirant du système proposé par la Wii.

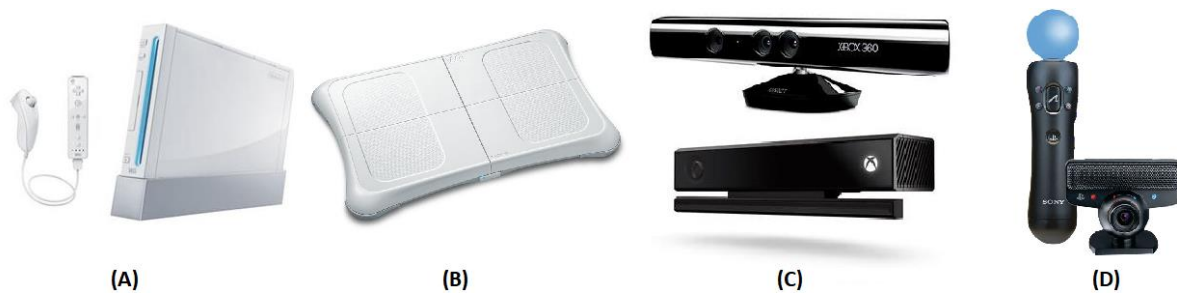


Figure 3 : (A) Nintendo Wii, (B) Wii Balance Board, (C) Kinect version 1 en haut et version 2 en bas, (D) PS Move

Les 3 géants de l'industrie du jeu vidéo que sont Nintendo, Microsoft et Sony vont alors se disputer un marché du jeu en mouvement ouvert par Nintendo. Pourtant, la littérature scientifique va utiliser essentiellement les dispositifs de Nintendo et de Microsoft. On retrouve alors de nombreux articles faisant état des bénéfices du « Serious Gaming » ou « Jeu Sérieux » dans le cadre notamment d'activités physiques proposées aux seniors dans les institutions.

On se sert des jeux Wii, de la WBB et de Kinect pour faire bouger les personnes âgées qui perçoivent alors ces activités comme divertissantes et stimulantes par leur côté ludique et parfois compétitif. Des articles attestent des bénéfices d'exercices physiques avec de tels dispositifs, on remarque un effet positif sur l'équilibre dynamique et la confiance en cet équilibre avec le système Wii Fit (avec une WBB) [186, 187] et aussi une réduction du risque de chute et de la peur de chuter [188, 189, 190, 191, 192] ; un avantage en réalité virtuelle (Kinect) du point de vue de l'interaction en comparaison avec un protocole sans réalité virtuelle

[193] et une amélioration des paramètres de la marche [194, 195, 196] ; un tapis de danse permettrait également d'améliorer les capacités à faire des pas [197].

Une autre utilisation de ces systèmes est aussi faite en laboratoire puisqu'ils sont des investissements à peu de frais pour s'équiper d'une plateforme de force ou d'une caméra capable d'une reconnaissance de mouvement. Ainsi, les chercheurs ont pu développer leurs propres applications en fonction de leurs thématiques de recherche, s'affranchissant ainsi du catalogue de jeux grand public commercialisés sur ces supports.

b) Réalité virtuelle non-immersive et littérature scientifique

Les dispositifs de Nintendo et de Microsoft, par leur potentiel et leur faible coût, figurent dans une part importante de la littérature scientifique portant sur la « réalité virtuelle » ; or on constate que l'accès du grand public à de nouvelles itérations technologiques a fait évoluer, préciser les concepts derrière le terme de « réalité virtuelle ». Le degré d'immersion est maintenant mis en avant.

Pour l'exemple, Mirelman et ses collaborateurs ont utilisé la réalité virtuelle pour différentes applications, avec un simple écran et un robot pour une interaction avec les pieds (navigation dans l'environnement virtuel) [198], avec une projection (assimilable à un écran) et un tracking infrarouge des pieds pour l'évitement d'obstacles virtuels en marchant sur un tapis roulant [199], avec un protocole similaire au précédent mais utilisant Kinect pour la détection [193, 200], puis avec un visiocasque [201]. C'est suite à l'utilisation de ce visiocasque que cette équipe de recherche va utiliser le terme de « Réalité Virtuelle Non-Immersive » sur la prochaine utilisation du protocole avec Kinect et un écran [202]. La catégorisation des dispositifs de réalité virtuelle selon leur degré d'immersion permet de discerner les générations de matériel, plus particulièrement les systèmes grand public, étant donné que les laboratoires disposent de visiocasques depuis plusieurs décennies déjà. On considérera alors les simples écrans comme des systèmes non-immersifs, les projections sur une surface excédant le champ de vision comme des systèmes semi-immersifs et les visiocasques proposant une vision à 360° comme des systèmes immersifs.

Attention : cette considération est restrictive puisqu'elle réduit l'immersion à la vision ; or l'immersion doit faire appel au maximum d'entrées sensorielles pour être cohérente. Elle doit faire appel à l'audition, à l'haptique, à la proprioception dont le but est d'obtenir une fidélité psychologique [203].

2.2.3. L'avènement des visiocasques

Le premier visiocasque est élaboré par Daniel Vickers de l'Université d'Utah en 1970 et son porteur est immergé visuellement dans un monde virtuel dans lequel il peut observer la scène virtuelle en tournant la tête [203].

Depuis cette première version, divers constructeurs ont conçu des modèles toujours plus innovants, profitant des dernières évolutions technologiques. Que ce soit en matière d'écran, de processeurs, de matériaux, améliorant toujours la qualité visuelle, la puissance de calcul, la légèreté, le confort. Tous ces concepts ont évidemment un coût qui limite l'usage de ces technologies aux secteurs de la recherche ou de l'ingénierie de pointe. On notera tout de même des tentatives d'entrée sur le marché grand public de ces visiocasques avant les années 2000 avec le Virtual Boy de Nintendo en 1995 (800 000 unités vendues) ou le Sega VR de Sega en 1991 (finalement limité aux bornes d'arcade) (Figure 4).



Figure 4 : (A) Virtual Boy de Nintendo, (B) Sega VR de Sega

Ces tentatives n'ont pas su séduire les consommateurs, les technologies de l'époque ne permettant pas une expérience satisfaisante ; les projets sont rapidement abandonnés et les constructeurs se recentrent plutôt sur la prochaine génération de consoles de jeu. On remarque néanmoins que la conception de ces deux visiocasques est relativement proche de celle des visiocasques actuels notamment en termes de design et d'ergonomie, surtout pour le modèle produit par Sega. On y retrouve la vision et l'audio disposés sur un arceau englobant le crâne par le dessus et les côtés.

Il faudra attendre 2012 et la création de l'Oculus Rift (Dev Kit 1) par la société Oculus, rachetée en 2014 par Facebook pour voir relancée la course à la réalité virtuelle pour le grand

public. Oculus est rejoint par Samsung qui annonce le Samsung Gear VR en 2014 (développé par Oculus) et HTC son HTC Vive, Sony se joint alors à la course avec le PlayStation VR. Samsung sortira le Gear VR fin 2015 tandis que les 3 autres lancent leurs produits à la vente en 2016 (Figure 5).



Figure 5 : (A) Oculus Rift, (B) Samsung Gear VR, (C) HTC Vive, (D) Sony PlayStation VR

Ces visiocasques reposent sur des plateformes différentes. L'Oculus Rift et l'HTC Vive doivent être connectés à un ordinateur et fonctionnent avec la plateforme Steam et son application dédiée Steam VR que la société Valve a annoncée en 2014. Le Samsung Gear VR a un fonctionnement différent puisqu'il est un accessoire pour smartphones Samsung (séries Galaxy S et Note jusqu'à présent). Le téléphone sert alors d'écran et de processeur pour l'affichage. Le PlayStation VR requiert l'utilisation de la console PlayStation 4 et l'utilisation exclusive des jeux PlayStation VR bien qu'il existe à ce jour des moyens détournés d'utiliser le PlayStation VR sur PC. A noter que le PlayStation VR réutilise les accessoires PS move de la génération précédente. Les tarifs sont bien différents mais restent bon marché pour un cadre professionnel puisque HTC démarre à environ 900 €, Oculus à environ 700 €, Samsung à environ 100 € (offert avec certains smartphones) et Sony à environ 400 €. Des tarifs à nuancer puisqu'ils ne sont que des accessoires nécessitant un autre appareil pour fonctionner à savoir un PC à environ 1 200 € pour HTC et Oculus, un smartphone Samsung à environ 700 € et une PlayStation à environ 400 € (tarifs minimums, hors offres et variations de marché).

Il est important de mettre en avant les différences techniques entre ces dispositifs. Le Vive et l'Oculus fonctionnent grâce à plusieurs types de capteurs. Ils détectent d'abord leurs changements de position : grâce à des balises infrarouges externes, le casque va se repérer dans l'espace et sa position sera retranscrite presque immédiatement dans la scène virtuelle. Ce type de « tracking » externe présente l'avantage d'avoir peu de dérive après calibration sauf en cas de mouvement de la balise elle-même. Une fois fixée, ça ne doit plus être un problème. Qui dit « tracking externe », dit « zone de déplacement ». En effet, ces deux systèmes vont être limités par l'espace que peuvent suivre les balises, on retrouve par exemple sur l'HTC Vive de première

génération une zone de 4m x 4m. Il est toutefois possible sur Oculus CV1, HTC Vive Pro et Valve Index notamment, de remplacer les balises par un système de capture optocinétique tel que ceux de la société Optitrack, proposant un accessoire à disposer sur le visiocasque pour un tracking sur une zone plus étendue. La zone est limitée cette fois par l'espace maximum permis par les caméras et leur nombre essentiellement. Le site de l'entreprise indique une surface de 30m x 30m. Le tracking externe a un autre inconvénient ; tout objet ou personne qui se trouverait entre la balise et le casque mettrait en défaut le système de positionnement. Une perte de tracking peut devenir dangereuse car soudaine, elle peut engendrer une chute faisant suite à la perte de repères visuels. A ce jour, ces systèmes de positionnement sont les plus performants et offrent la meilleure expérience. Cependant, la technologie infrarouge employée par HTC et Oculus est à distinguer de celle utilisée par Sony. Le nombre de balises (2 au minimum) utilisées par le Vive et l'Oculus permet une localisation dans l'espace plus fine en 3D que l'unique caméra du PlayStation VR qui filme de face. La caméra PlayStation VR ne permet que de filmer de face, il faut donc limiter les déplacements pour rester dans le champ mais aussi éviter de se retourner complètement puisqu'elle ne peut pas analyser la position en ne voyant que l'arrière du casque. Tous ces casques sont en revanche équipés de capteurs internes (accéléromètres et centrales inertielles) permettant la retranscription des rotations de la tête pour en faire suivre l'affichage. Ils viennent compléter les données acquises par le tracking externe pour les systèmes qui en possèdent. Pour le Gear VR de Samsung, il n'y a pas de tracking et donc pas de déplacements, uniquement des rotations qui vont être appliquées à un point de vue fixe dans l'environnement virtuel. Ces capteurs qui détectent les rotations vont les détecter par rapport à une position initiale qui va servir de référence, or ce fonctionnement va engendrer un phénomène de dérive. Cette dérive nécessite une recalibration régulière et donc l'affectation d'une nouvelle position initiale de référence.

Ces dispositifs sont fournis avec des manettes traquées également et orientées dans l'espace (excepté pour la manette du Gear VR avec Contrôleur qui subit une dérive d'orientation similaire au casque).

Les différences techniques qui distinguent ces visiocasques vont implicitement départager les utilisateurs et les usages. Tandis que le Samsung Gear VR qui ne permet pas de déplacement, séduira plutôt pour la visualisation de contenus à 360°, le PlayStation VR séduira les joueurs qui possèdent déjà une PlayStation 4 et les visiocasques HTC et Oculus séduiront les joueurs et technophiles qui ont les moyens d'investir dans de tels systèmes.

a) Les dernières améliorations sur les visiocasques.

Un focus sur les visiocasques pour ordinateur d'HTC et d'Oculus permet de voir les pistes d'amélioration s'ouvrir avec l'inclusion notamment d'autres technologies. Outre l'incessante amélioration de la qualité des écrans, des puissances de calcul et du confort, les constructeurs travaillent aujourd'hui pour s'affranchir des contraintes que sont les fils, les PC et le tracking externe.

Du côté d'Oculus, les développements en ce sens ont donné d'abord un Oculus Go, autonome, comparable à un Gear VR qui posséderait déjà un téléphone, puisqu'il est pourvu de ses propres écrans, mémoire et processeur. A l'instar du Gear VR, l'absence de tracking externe ne permet pas de déplacement. Oculus propose alors un nouveau visiocasque en 2019, le Quest, un casque autonome fonctionnant sur batterie qui suit sa propre position, cette fois, en filmant l'environnement extérieur pour y trouver des points de repère. Il dispose de son propre processeur et donc d'une puissance limitée par l'appareil lui-même. Oculus profite de l'année 2019 pour sortir un second modèle, le Rift S, perçu comme une version améliorée du Rift original dont le tracking est similaire au Quest. Ce dernier peut profiter de toute la puissance d'un PC haut de gamme pour faire fonctionner les applications les plus gourmandes.

De son côté, HTC sort une version Pro de son Vive, proposant une ergonomie différente grâce un système de fixation rigide plus confortable. Hormis les habituelles améliorations, HTC propose en parallèle un accessoire à ajouter pour une utilisation sans fil du casque. Il propose également de nouveaux accessoires, des HTC Trackers qui sont des dispositifs conçus sur la même base que le casque et les manettes et dont le positionnement et l'orientation se font par l'intermédiaire des balises infrarouge. Ces HTC Trackers permettent tout simplement de localiser et d'orienter un objet virtuel dont le comportement est alors calqué sur celui d'un objet réel auquel est apposé le tracker. Il peut s'agir d'une partie du corps ou d'un objet quelconque. HTC permet donc aux usagers de cette technologie de bénéficier d'un système de capture du mouvement financièrement plus accessible. Lors du Consumer Electronics Show de 2019 à Las Vegas (Nevada, USA), HTC présente une nouvelle itération du Vive Pro, le Vive Pro Eye. Ce visiocasque est pourvu d'un Eye-tracker qui permet de suivre le mouvement des yeux et ainsi de savoir vers quel élément de l'environnement virtuel la personne est en train de focaliser. C'est grâce à un partenariat avec la société Tobii, spécialisée dans l'Eye-tracking que cela a été possible. Il faut savoir que Tobii équipait déjà des casques Vive d'Eye-trackers aux entreprises et laboratoires qui le souhaitent. Cette intégration dans une version commercialisée directement par HTC permet notamment d'abaisser les coûts. L'objectif de cette technologie dans les nouveaux casques de HTC serait de concentrer la puissance requise pour l'affichage

de textures plus fines seulement à l'endroit où l'utilisateur regarde, permettant de laisser le reste du champ flou. Outre le gain de performance permis par cet accessoire, les applications de suivi du regard en réalité virtuelle sont nombreuses et ne manqueront pas d'intéresser la recherche ou encore le marketing. Fin 2019, HTC se pose en concurrent direct d'Oculus et ses Quest et Rift S avec le Vive Cosmos utilisant également un tracking dit « inside-out » qui va permettre la localisation du casque dans l'espace ainsi que les manettes par l'intermédiaire de ses caméras.

b) Quid de casques plus confidentiels ?

Les développements high-techs sont nombreux et beaucoup d'acteurs indépendants développent des solutions dans l'ombre des géants industriels. Ces développements donnent des indicateurs sur le type d'améliorations qui feront leur apparition sur les futurs modèles. Par exemple, la société StarVR va miser sur l'étendue du champ de vision et la qualité d'écran en proposant un visiocasque avec également un eye-tracker permettant de distribuer la puissance de calcul sur la zone focalisée, important pour l'affichage sur les « sub-pixels » et offrant une résolution plus fine. La société Pimax propose également un visiocasque avec un champ de vision étendu à 200° là où Oculus et HTC proposent des solutions autour de 110° (Vive et Rift en premières versions commerciales). En effet, la vision périphérique a une importance à ne pas négliger pour la détection du mouvement. Ce casque dispose d'un affichage en 8K qui doit nécessiter beaucoup de puissance pour maintenir un affichage fluide.

c) Les interactions, entre technologies éprouvées et expérimentales

Interagir avec un environnement virtuel n'est pas naturel et semble nécessiter un apprentissage. La majorité des casques grand public aujourd'hui utilisent une ou deux manettes (« controllers » en anglais ; Figure 6) qui sont pour la plupart localisées et/ou orientées dans l'espace. L'interaction se fait donc par appui sur des boutons, déplacement des doigts sur trackpad etc. et par déplacement et orientation du controller dans l'espace. Des dispositifs tels que des controllers permettent de s'affranchir de nombreuses difficultés que poseraient des interactions supposément « naturelles ». En premier lieu, il faut savoir qu'un objet virtuel n'a pas de masse « réelle », elle est seulement virtuelle pour les besoins de réalisme de la physique de l'environnement virtuel. Cette absence de masse réelle donne à l'objet seulement la masse du dispositif interactif. Il n'a pas non plus de texture palpable, elle est visuellement représentée dans l'environnement virtuel et parfois un retour haptique vibratoire renverra à l'utilisateur des indices de rugosité par exemple.

Enfin, l'objet virtuel n'a pas de consistance, ce qui veut dire qu'aucune force ne sera appliquée en retour à vos doigts comme lorsqu'ils se resserrent sur un objet physique. Ces conceptions de l'objet virtuel orientent et proposent un avis sur les développements de technologie d'interaction.



Figure 6 : Controllers accompagnant les (A) HTC Vive, (B) Oculus Rift, (C) Samsung Gear VR

La société Leap Motion commercialise le Leap Motion Controller en 2013. Sa technologie repose sur l'infrarouge pour repérer les objets (forme, mouvement) qui se déplacent devant lui jusqu'à 1m environ. A l'origine, cet accessoire est développé pour proposer une nouvelle manière d'interagir avec un ordinateur puisqu'il est conçu pour reconnaître les mains et leur configuration. Toutefois, c'est dans son montage sur un visiocasque qu'il va nous intéresser. (Figure 7).

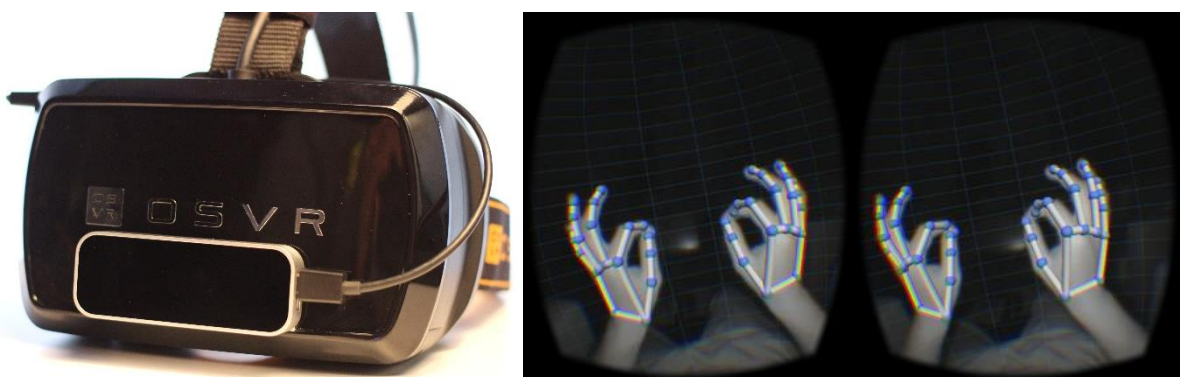


Figure 7 : Leap Motion Controller monté sur la face avant d'un visiocasque (à gauche) - exemple de rendu de la visualisation des mains en infrarouge et superposition d'un squelette virtuel en stéréoscopie (à droite).

Ce type de technologie va orienter la manière d'interagir avec l'environnement virtuel pour répondre aux limites liées aux objets virtuels. Ainsi, de nouvelles métaphores sont utilisées, on en retrouvait d'ailleurs à l'usage de Kinect 2 sur l'interface de la Xbox One. On va

fermer le poing, pincer avec le pouce et l'index, balayer main ouverte etc. On utilise alors une symbolique du geste pour l'appliquer au monde virtuel. Facebook a présenté en septembre 2020 la 2^{ème} itération de son Oculus Quest et, si les améliorations semblent de prime abord portées vers de meilleurs rendus avec une augmentation de la puissance de calcul et de la densité de pixels, elles sont aussi portées vers des interactions plus instinctives. Interactions qui fonctionnent soit en se servant simplement des caméras pour visualiser les mouvements des mains, soit grâce au développement d'un accessoire à fixer au poignet qui détecte d'une autre manière les mouvements des mains pour interagir avec l'environnement virtuel.

La saisie d'un objet selon un geste dit « réaliste » pourrait cependant devenir une difficulté notamment dans la physique du monde virtuel. Par exemple, si je veux saisir un cube réel, j'approche ma main puis resserre mes doigts sur l'objet, sur mes doigts et l'objet s'appliquent alors deux forces réciproques directement opposées et mes doigts sont arrêtés sur la surface de l'objet. La force que l'objet me renvoie me donne des indications sur le serrage et notamment s'il est suffisant pour lever et manipuler l'objet qui possède une masse/un poids, une texture, une inertie. Pour le cas d'un cube virtuel, les seuls indices possibles pour savoir si mes doigts sont bien posés sur l'objet sont de nature visuelle. L'objet est virtuel, il n'arrête donc pas mes doigts avec sa surface, je ne peux donc pas moduler la force de serrage. De plus dans le monde virtuel, la gestion de « collisions » peut générer un conflit. Les « collisions » sont des attributs appliqués à des objets pour qu'ils aient le comportement voulu dans l'environnement virtuel. Si je crée une table virtuelle, son plateau doit posséder cette contrainte de collision pour qu'un objet puisse y être posé, sinon il passera au travers. Une « collision » est donc nécessaire pour que les doigts virtualisés entrent en contact avec l'objet virtuel sans le traverser, le problème vient donc du fait que le comportement des doigts virtuels est calqué sur celui des doigts réels qui eux ne sont pas arrêtés en l'absence d'objet physique. Ainsi, un conflit apparaît entre la contrainte de collision appliquée à l'objet et la retranscription des mouvements des doigts qui cherchent malgré eux à traverser l'objet. Souvent, ce genre de conflits se traduit par des mouvements rapides et l'expulsion de l'objet comme si une force prodigieuse l'avait éjecté. C'est notamment pour cela que sur la représentation d'un personnage animé, on applique des contraintes à un squelette invisible, l'enveloppe n'étant alors qu'une façade esthétique traversable, le corps, les vêtements, les accessoires se traversent entre eux sans collision, principalement au niveau des articulations.

Ces conflits pour une interaction pseudo-réaliste ont conduit notamment au développement de prototypes de gants haptiques à vibration et/ou à retour de force, des bras articulés viennent s'opposer au mouvement pour donner la sensation de contact ou de résistance

avec un objet auquel il est possible de donner une consistance (Figure 8). Exemple : une contrainte élastique peut être appliquée pour simuler une balle en mousse qu'on malaxerait avec une force variable. Dans cet exemple, le retour de force retiendrait de plus en plus les doigts au fur et à mesure de leur déplacement comme le ferait une véritable balle en mousse.

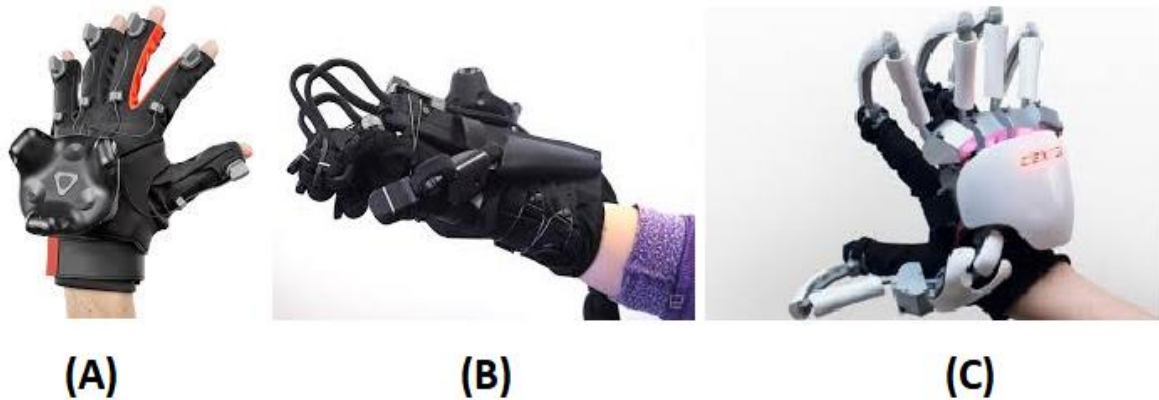


Figure 8 : Gants haptiques pour la réalité virtuelle - (A) Gant de Galor Systems avec vibrations pour retour haptique et un HTC Tracker pour localiser et orienter la main - (B) Gant HaptX modélisant les doigts et proposant un retour de force - (C) Gant Dexmo de Dexta Robotics permettant également la modélisation des doigts et un retour de force.

Ces dispositifs sont intéressants pour le cas de la saisie d'un objet et fournissent un retour sur ses propriétés sauf une en particulier, la masse de l'objet. Cette absence de masse implique qu'il n'est pas vraiment possible de sentir quelle doit être la force de préhension à appliquer pour que l'objet ne glisse pas des mains ni ne se brise. Les développeurs vont-ils prendre un tel paramètre en compte à l'occasion de leurs prochains travaux ? Une vidéo de démonstration de la société Senseglove mettant en scène le Sense Glove DK1 suggère une telle prise en compte puisque l'utilisateur y brise un bocal de verre virtuel. Néanmoins, il manquera tout de même la force verticale indiquant que l'objet est attiré vers le bas entre vos doigts. Ces gants, ne permettent pas non plus un retour de force sur leurs mouvement globaux, autrement dit, pousser un objet ne vous arrêtera pas, il s'agit d'un retour de force entre les doigts. Notons également que les doigts sont en contact permanent avec le système de fixation, ce qui laisse une sensation de toucher même sans contact virtuel. Comme on peut le voir sur les illustrations (Figure 8), ces dispositifs ne passent pas vraiment inaperçus et il serait intéressant d'étudier l'impact de leur masse et de leur volume sur la motricité et la posture pour pouvoir explorer des pistes d'innovations.

Se déplacer physiquement pour se déplacer dans l'environnement virtuel est une forme d'interaction qui nécessite de retranscrire les déplacements (au moins) du casque dans le repère des balises de tracking pour les simuler dans l'environnement virtuel. Or, l'aire de « jeu » est souvent restreinte. Pour s'affranchir de ces restrictions, il existe des tapis dits

« omnidirectionnels » qui utilisent différentes techniques/technologies. Le système le plus complexe est un tapis roulant actif qui permet des déplacements dans tous les sens du repère en 2D. L'objectif de ce tapis est de maintenir l'utilisateur en son centre qu'importe sa vitesse ou son sens de déplacement. Un système moins complexe, moins onéreux et moins encombrant consiste à utiliser des semelles spéciales sur une surface glissante. L'utilisateur marche/court sur place en glissant ses pieds sur la surface du tapis tandis qu'un harnais maintient son corps au-dessus du tapis (Figure 9). Ces tapis permettent d'une part d'explorer de plus larges zones virtuelles sans avoir à utiliser la téléportation, mais aussi d'assurer un certain niveau de sécurité en balisant complètement la zone de déplacement réel réduite à la surface du tapis. Quelques limites peuvent être soulevées concernant ces tapis puisqu'ils ne permettent pas un déplacement réel, des informations sensorimotrices peuvent manquer ou générer un conflit sensoriel puisque l'utilisateur n'est pas confronté à l'inertie de son corps et son système vestibulaire ne percevra pas les accélérations horizontales normalement induites lors d'un déplacement réel.

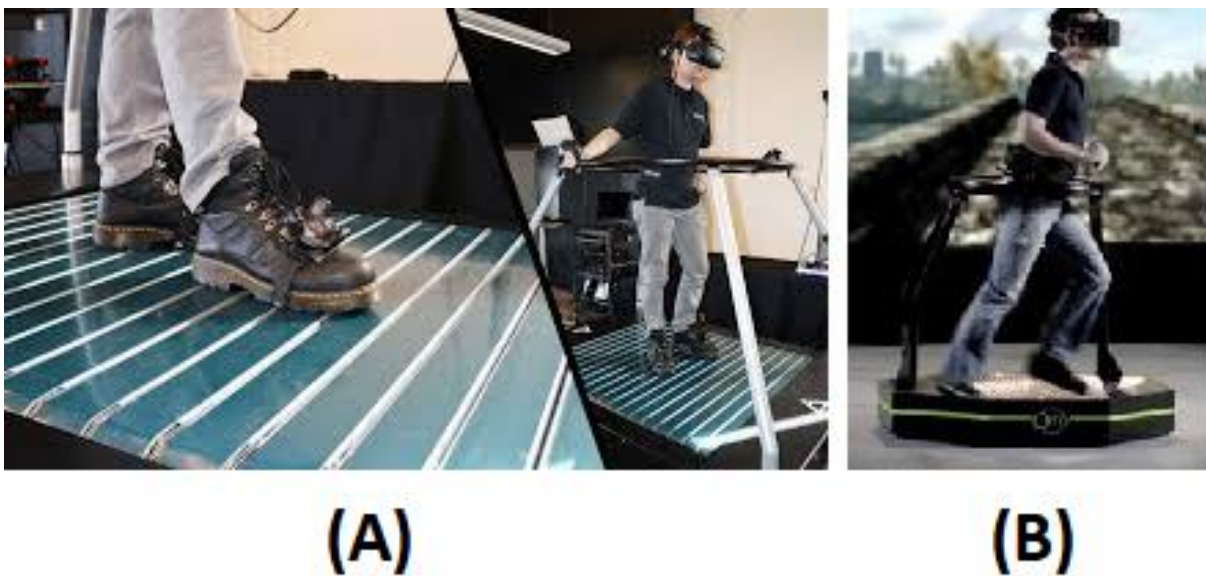


Figure 9 : Tapis omnidirectionnels (A) actif par Infinadeck, (B) passif par Omni

2.2.4. CAVE (Cave Automatic Virtual Environment)

Le système CAVE est généralement un cube constitué d'écrans sur lesquels est projetée une scène virtuelle en 3D stéréoscopique. Le champ de vision est limité par le nombre d'écrans puisque comme l'illustre la Figure 10, le « plafond » et l'arrière ne bénéficient pas de la projection. On limitera alors la scène virtuelle à des objets situés de face et un peu sur les côtés. L'espace d'exploration est limité à la taille du sol entouré des écrans de projection, le sol est d'ailleurs souvent lui-même un écran de projection avec le risque que l'affichage soit

partiellement occulté par l'utilisateur. C'est pour cette raison que le projecteur du sol est placé le plus en avant possible de l'utilisateur qui occulte alors l'affichage seulement vers l'arrière. Cette technologie sera plutôt considérée comme semi-immersive.

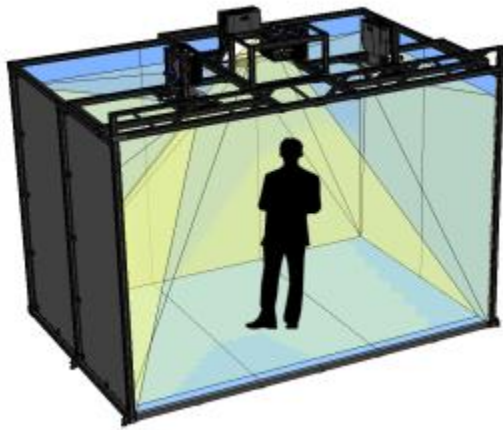


Figure 10 : CAVE avec système de projection par l'intérieur

La complexité du système repose à la fois sur l'affichage et sur le suivi du point de vue du sujet. En effet, si la projection est faite sur 4 faces, les intersections de ces faces ne doivent pas être visibles, la déformation de chaque image est donc calculée pour que les arêtes ne soient pas visibles du point de vue de l'observateur à l'image d'un « trompe l'œil » qui nécessite un point de vue spécifique (Figure 11).



Figure 11 : « Trompe l'œil » nécessitant un point de vue particulier, selon le point de vue adéquat (à gauche), selon un point de vue décalé (à droite).

Si le point de vue de l'observateur module l'affichage pour obtenir une image sensée, il faut connaître en tout temps la position de ce point de vue. Pour cela, on utilise un système de motion capture 3D avec plusieurs caméras infrarouges qui vont traquer dans l'espace la paire de lunettes stéréoscopiques que porte l'utilisateur. Les lunettes sont surmontées d'une

constellation de marqueurs passifs réfléchissants, renvoyant aux caméras la position et l'orientation des lunettes dans l'espace et par extension la tête de l'observateur.

Pour proposer la stéréoscopie, les lunettes sont dites actives et se synchronisent avec l'affichage. Succinctement, le fonctionnement d'un tel dispositif repose sur une projection alternative et la persistance rétinienne. Les projecteurs projettent alternativement une image pour l'œil droit puis une image pour l'œil gauche et ainsi de suite tandis que les lunettes vont occulter la vision de chaque œil alternativement une image sur deux. Si on utilise une fréquence d'affichage de 120 Hz (ou images par seconde, ips), l'œil gauche verra une image sur deux soit 60 ips et l'œil droit verra les 60 autres images. Pour obtenir un certain niveau de fluidité d'affichage, il faut donc une projection à une fréquence du double. Ici, la persistance rétinienne permet de ne pas distinguer les périodes occultées par les lunettes actives et de garder cette impression de fluidité, cela dépendant évidemment de la fréquence de rafraîchissement.

2.2.5. Quelles différences entre les visiocasques et le CAVE ?

Outre le degré d'immersion entre les deux technologies, elles présentent des différences importantes qu'il est important de considérer en fonction de l'usage souhaité.

a) Zone d'exploration

Comme expliqué lors des descriptions technologiques, les dispositifs de réalité virtuelle que sont les visiocasques ou le CAVE disposent de zones d'exploration limitées technologiquement, le CAVE par la surface de projection, les visiocasques par la zone de balisage. En dépit des innovations récentes et les possibilités de couplage comme l'Oculus Rift S/Quest qui utilisent les caméras du casque pour se repérer dans l'espace ou encore le module permettant d'utiliser des caméras de motion capture. L'isolation visuelle voire sonore que proposent les casques limite les zones d'exploration pour d'évidentes questions de sécurité : l'espace « réel » devant être exempt d'obstacles pour éviter toute rencontre/collision malencontreuse. Ces différences conduisent au lieu d'utilisation. Pour un CAVE, selon la technologie d'affichage qu'il utilise, à savoir une projection par l'intérieur du cube ou alors par l'extérieur, il faudra réserver un espace suffisant pour la logistique et le montage de la structure. De plus, notamment pour le cas d'un affichage par l'intérieur (Figure 10), la concentration de 4 vidéoprojecteurs dans un petit espace génère de la chaleur qu'il faut envisager de limiter avec un système de ventilation ou de climatisation. La hauteur sous plafond peut également devenir un facteur limitant, il faut donc prévoir une hauteur suffisante pour le montage de la structure.

Pour les casques de réalité virtuelle, selon la technologie utilisée, il peut être nécessaire de fixer des balises en hauteur. Ces dernières sont alimentées et il est préférable de les placer en hauteur, ce qui évite une perte de tracking lorsque quelqu'un entre dans l'air de jeu. En dépit de la longueur de câble, il est nécessaire d'avoir une prise de courant assez proche. L'utilisation d'un trépied est possible, toutefois, un mouvement de celui-ci peut nécessiter de recalibrer l'aire de jeu. A savoir également que des mouvements d'une balise en cours d'utilisation (ex : bousculer un trépied) peut devenir dangereux pour l'utilisateur puisque l'environnement virtuel va bouger de manière incohérente, ce qui pourrait entraîner une chute. Les casques ont, pour la majorité encore, une connexion filaire, ce qui implique :

- d'une part une limitation de l'espace d'exploration en fonction de la longueur de câble bien qu'il existe tout de même des systèmes d'extension
- et d'autre part le risque de s'emmêler dans le câble. Ce dernier limite les rotations sur place et peut nécessiter la présence d'un tiers pour gérer le câble en direct. Trébucher ou marcher sur le fil peut endommager la connectique en tirant soit sur le casque, soit sur l'ordinateur.

b) Coût

Les dispositifs de réalité virtuelle, quels qu'ils soient, ont un coût mais le marché étant aujourd'hui ouvert au consommateur, les visiocasques ont des tarifs plus accessibles (environ 2 000 € avec un PC suffisamment puissant) tandis qu'un CAVE peut coûter plusieurs centaines de milliers d'euros (structure, caméras, projecteurs, motion capture...). Le marché ouvert au public a deux conséquences à savoir la limitation du prix par économie d'échelle ainsi que des développements et innovations continues, la sortie d'un nouveau modèle réduisant souvent drastiquement les tarifs des modèles précédents.

En termes de développement, de nombreux jeux et applications utilisent le moteur de jeu Unity qui dispose d'une version gratuite et de plusieurs options d'achats offrant plus de fonctionnalités. Cette gratuité, pour les utilisateurs amateurs notamment, ouvre de nombreuses bibliothèques créées par la communauté pour la communauté. La créativité devient donc partagée et étend les possibilités offertes par le moteur de jeu et réduit ainsi certains temps de développement et donc son coût. L'ouverture au grand public implique des jeux développés pour le grand public, des applications ou encore des démonstrations gratuites. Ce marché concerne des laboratoires ou entreprises qui n'ont pas le besoin ou pas les moyens pour des développements personnalisés. Ils peuvent ainsi se contenter d'acheter ces applications sur une plateforme d'achat, souvent pour moins d'une centaine d'euros.

c) Exportabilité et compatibilité

Il est extrêmement contraignant et donc déconseillé de déplacer une structure telle que celle du CAVE. Les écrans sont fragiles, salissants et le montage des projecteurs et des caméras nécessite une configuration chronophage et souvent laborieuse. Quant aux applications, elles doivent être conçues pour le CAVE et il faut y connecter un ordinateur disposant d'une carte graphique puissante. Les visiocasques, eux, se transportent aisément dans une valise adaptée et sont utilisables avec un ordinateur portable. Attention toutefois, à l'heure actuelle, le module sans fil du casque HTC Vive nécessite une prise adaptée (PCIe) directement sur une carte réseau, ce qu'on ne retrouve pas couramment sur un ordinateur portable, à moins peut-être de pouvoir y connecter une carte externe. Dans le cas contraire, il faudra opter pour la solution filaire ou une tour. Aujourd'hui, certains visiocasques s'affranchissent des balises, les rendant ainsi encore plus facilement exportables dans d'autres lieux. En termes de compatibilité, leur fonctionnement, pour la plupart avec Steam VR (outil de Steam) facilite nettement la compatibilité des différents systèmes. Autrement dit, il est possible de connecter facilement les différents visiocasques grand public sur un ordinateur compatible et pourvu de Steam VR et d'utiliser une application quel que soit le matériel, à la différence des consoles de jeux n'acceptant que les jeux/applications développés spécifiquement.

d) Isolement versus transparence

L'affichage des environnements virtuels entre les deux dispositifs sont différents. Le CAVE propose la visualisation d'une image projetée au travers de lunettes stéréoscopiques. Les lunettes sont transparentes, ce qui permet de voir en direct son propre corps, la manette etc. Les visiocasques (de réalité virtuelle et non de réalité augmentée ou mixte) isolent visuellement l'utilisateur de l'environnement proposant un écran juste devant les yeux. L'utilisateur de visiocasque n'a donc pas de retours visuels sur l'environnement extérieur ni même ses propres membres.

Il existe des solutions plus ou moins onéreuses afin de modéliser partiellement voire totalement le corps de l'utilisateur sous la forme d'un avatar dont les mouvements sont calqués sur l'utilisateur. Le CAVE est pourvu d'un système de motion capture (mocap) par nécessité ; pour ce qui concerne le tracking des lunettes, le matériel est déjà présent. Cependant, il est nécessaire de coupler le logiciel de mocap avec l'application de réalité virtuelle avec un marker-set ou un jeu de clusters (constellations) précis pour que l'application en réalité virtuelle associe automatiquement le segment corporel traqué au bon segment de l'avatar.

Pour décrire simplement le fonctionnement de ces deux configurations de mocap, le marker-set est un modèle de placement de marqueurs réfléchissants (passifs), la plupart du temps posés au niveau des articulations pour limiter les mouvements du marqueur dus aux mouvements de la peau et des muscles. L'utilisation de clusters, quant à elle, permet une reconnaissance automatique grâce à la configuration unique de 3 ou 4 marqueurs espacés les uns des autres. Chaque cluster étant unique, ils peuvent être reconnus par le système de mocap et associés à ce qu'on appelle un rigid body. Le rigid body peut alors être attaché à un objet, à un segment corporel voire à une manette. (Figure 12)

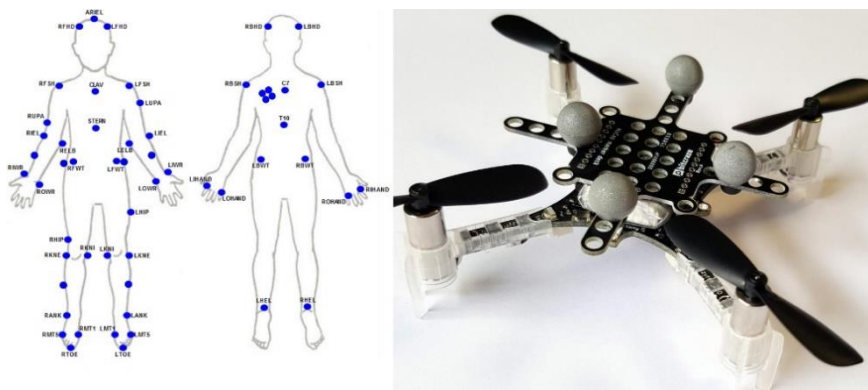


Figure 12 : Exemple de marker-set (à gauche), exemple de cluster placé sur un drone (à droite).

e) Expérience multi-utilisateurs.

Les systèmes de réalité virtuelle peuvent potentiellement accueillir plusieurs utilisateurs. Il est toutefois nécessaire de distinguer deux types d'expérience multi-utilisateurs, la première consistant à regrouper des utilisateurs géographiquement éloignés dans une expérience virtuelle commune. Dans ce cas, seuls les avatars représentant les utilisateurs sont réunis. La seconde consiste à placer les utilisateurs dans le même espace à la fois physique et virtuel. Cette dernière est la plus complexe à la fois d'un point de vue technologique et aussi au niveau de la sécurité.

Pour le cas de la seule expérience partagée, il suffit d'interconnecter les sessions de jeu virtuel de la même manière que les jeux en ligne classiques. Chaque utilisateur dispose alors de son matériel dédié dans son propre espace d'exploration.

Pour un partage de l'espace à la fois réel et virtuel, des contraintes s'ajoutent. Pour une double utilisation avec des visiocasques, il faut que chaque utilisateur puisse connaître en temps réel la position du ou des autres utilisateurs dans un seul et même repère et réciproquement. Il est nécessaire de représenter un avatar pour avoir plus que le casque et deux manettes dans la scène virtuelle et fournir suffisamment d'informations sur les autres utilisateurs. Ceci implique un système de motion capture déployé pour tous les utilisateurs avec une seule et même origine

pour l'espace calibré. Il faut ensuite synchroniser les avatars dans les expériences virtuelles pour éviter les collisions malencontreuses. Il serait intéressant de savoir quelles solutions sont envisagées pour une expérience multi-utilisateurs notamment avec les derniers développements de visiocasques sans balises (inside-out tracking).

Dans un système CAVE une solution multi-utilisateurs existe et cette fois la contrainte ne réside pas dans la représentation de l'autre utilisateur puisqu'il n'y a pas d'isolement, mais elle dépend de l'affichage. En effet, le dispositif d'affichage, cette fois, est commun. Chaque utilisateur regarde les mêmes écrans simultanément mais avec des points de vue différents. Pour reprendre l'exemple avec le « trompe l'œil » (Figure 11, p.42), la considération d'un seul des deux points de vue n'offrirait une expérience visuelle cohérente qu'à un seul des deux utilisateurs. Le développement multi-utilisateur du CAVE s'est orienté vers une technologie d'affichage plus haute fréquence. De la même manière que l'alternance de deux images avec des lunettes actives permet d'afficher en trois dimensions. L'affichage pour deux utilisateurs propose une alternance de 4 images, une pour chaque œil. C'est pour conserver une fréquence d'affichage raisonnable pour chaque œil qu'il faut augmenter la fréquence de rafraîchissement. Ainsi, pour avoir un rafraîchissement à 60 images par seconde (ips) pour un œil, il sera nécessaire de multiplier ce chiffre par le nombre d'yeux, 4 yeux requerraient 240 ips. A l'inverse, un vidéoprojecteur avec une fréquence maximale de 240 images par secondes pourra afficher à 120 ips par œil pour un unique utilisateur et pourra afficher à 30 ips par œil pour 4 utilisateurs en simultané. Cet affichage alterné des images pour chaque utilisateur doit être synchronisé avec chaque paire de lunettes stéréoscopiques actives.

2.2.6. Qu'attendre de la réalité virtuelle pour la recherche ?

En réalité virtuelle, les applications autres que le jeu sont de plus en plus utilisées. On retrouve des dispositifs servant de support notamment dans l'immobilier, on peut alors visualiser des clichés à 360° ou encore naviguer dans les projets d'architecture numérisés. Dans des aspects santé, il y a des applications développées pour les kinésithérapeutes spécialisés dans les pathologies vestibulaires. Ces applications qui ont d'abord servi à virtualiser les outils physiques habituellement utilisés, permettent notamment de dissocier les informations visuelles et vestibulaires et par exemple d'évaluer les préférences sensorielles.

Dans le même ordre d'idée, la réalité virtuelle pourrait être utilisée pour palier certains défauts d'un système comme l'Equitest. Equitest est un dispositif composé d'une plateforme de force oscillante capable aussi de translater, ainsi que d'un panorama (caisse) oscillant. Les différents tests proposés sollicitent principalement la vision, le vestibule ou la proprioception

dans le maintien de l'équilibre postural. Les conditions proposées par Equitest testent l'équilibre postural yeux ouverts et fermés, avec un support visuel fixe ou alors qui bouge en fonction des oscillations, idem pour la plateforme de force qui est soit fixe soit oscillante. Les défauts d'un tel dispositif concernent notamment la motorisation du panorama, bruyante, qui fournit lors des oscillations, des indices sonores sur les déplacements du centre de gravité en amplitude et en vitesse. Un tel défaut pourrait être aisément comblé à l'aide d'un visiocasque dont l'affichage serait fixe, sous-entendu, indépendant des déplacements du casque.

a) Quels seraient les avantages de la réalité virtuelle pour la recherche

De manière générale, le virtuel et la simulation sont utilisés pour apprendre, éviter un danger réel etc. C'est pourquoi il existe des simulateurs de vol ou de pilotage. D'un point de vue clinique, on pourra citer par exemple le traitement des phobies par exposition progressive (ex : acrophobie, agoraphobie, arachnophobie...). Cette exposition progressive à des stimuli, principalement visuels et sonores, permet aux patients de se familiariser avec le contexte générateur d'anxiété sans danger physique et de manière contrôlée. Plus spécifiquement, dans la littérature concernant les tests et échelles sur le risque de chute, on remarque souvent un manque de contextualisation. Autrement dit, il est souvent demandé aux participants d'effectuer une tâche sous la forme d'une suite d'actions motrices, sans que cette tâche ne soit porteuse de sens ou réalisée dans un environnement commun. Un environnement virtuel peut alors être créé pour sortir du cabinet médical, du couloir d'hôpital, du laboratoire et proposer un environnement de la vie courante comme un appartement, une portion de rue etc., représentant alors un environnement potentiellement familier. En effet, l'impact de l'environnement sur le comportement n'est pas à négliger, si on dit souvent que les accidents de la route surviennent dans des zones proches du domicile et qu'on fréquente régulièrement, on peut envisager que l'environnement influence le comportement, l'attention... Peut-on imaginer qu'à force de connaître un endroit, on finisse par automatiser la manière d'y agir, laissant l'attention à d'autres tâches, ou pas ? Il nous est tous arrivé d'aller dans une pièce de notre domicile et d'oublier pourquoi, notre attention portait sur autre chose. Porte-t-on notre attention sur autre chose parce qu'on connaît le lieu dans lequel on évolue, parce qu'on n'y attend aucune surprise ? C'est peut-être dans cet environnement familier, où on ne prête que peu d'attention à ce qui nous entoure, qu'on prend le risque de se faire surprendre par un élément inattendu. Cet élément conduira-t-il à la chute ?

La réalité virtuelle permet, dans un même lieu physique, de proposer diverses expériences virtuelles, de peu à fortement sollicitantes du point de vue attentionnel. Le niveau de

sollicitation est parfaitement contrôlable et reproductible à la manière de n'importe quel jeu vidéo proposant plusieurs niveaux de difficulté et il ne met pas directement en péril la sécurité de l'utilisateur, le danger étant simulé. Si on souhaite évaluer la réaction d'une personne face à un danger de collision, avec un cycliste par exemple, l'utilisateur, s'il n'est pas capable d'éviter la collision, ne sera pas percuté. Si on peut discuter le niveau d'engagement d'une personne pour éviter un « faux » impact, une augmentation du niveau de présence pourrait être une piste d'amélioration. Il est donc envisageable d'augmenter progressivement le niveau de sollicitation attentionnelle, de contrainte spatiale et/ou temporelle afin, par exemple, de mettre en évidence des différences dans les stratégies cognitivo-motrices employées pour faire face à ces situations pouvant compromettre l'équilibre.

Si la réalité virtuelle offre un contrôle optimal de l'environnement et la simulation d'un environnement familier, plus proche de la vie courante, on peut également s'intéresser à moduler la tâche. En effet, proposer un environnement spécifique permet également de proposer une tâche d'interaction avec cet environnement. Le reproche qu'on peut faire au test Timed Up and Go est qu'il n'est qu'une suite d'actions motrices, certes cohérentes du point de vue de leur utilisation régulière, mais dans ce contexte de test, quasiment sans aucun sens ou but. Qui se lèverait de sa chaise pour aller faire demi-tour à trois mètres puis retourner s'asseoir sans une bonne raison ? Il semble que c'est l'absence de but de cette tâche qui peut conduire certaines personnes à, par exemple, séquencer les différentes actions comme marcher trois mètres - s'arrêter - faire demi-tour - reprendre la marche. La question qu'il faut se poser est : « Est-ce que cette personne le ferait de la même manière si je lui donnais plutôt une consigne impliquant son déplacement dans une zone à trois mètres puis qu'elle retourne s'asseoir plutôt que la séquence d'actions motrices attendue ? ». La contextualisation de l'environnement peut ainsi être complétée avec la contextualisation de la tâche.

Proposition :

Pour éviter des consignes telles que :

« Vous êtes assis(e) sur la chaise, le dos bien collé au dossier, les pieds au sol et les mains au niveau des accoudoirs. A mon top, vous allez vous lever, marcher jusqu'à la marque, faire demi-tour, marcher vers la chaise puis vous rasseoir en recollant bien le dos au dossier pour arrêter le chronomètre. »

Voici une suggestion pour amener la tâche dans un contexte :

« Vous êtes entré dans votre salon, vous vous êtes assis pour regarder la télévision mais vous n'avez pas la télécommande, vous la cherchez autour de vous puis l'apercevez en face de vous.

Allez la chercher puis réinstallez-vous confortablement. Faites vite, vous ne voudriez pas manquer une seule seconde de votre programme préféré. »

Cette manière de donner les consignes permettrait-elle d'observer des différences dans les stratégies motrices et de créer de nouveaux observables ; témoins d'une meilleure mobilité ?

Au fil des lectures scientifiques, on remarque dans certains papiers originaux sur des tests, qu'ils manquent de précision pour reproduire l'expérimentation. Par exemple, dans l'article de Podsiadlo et Richardson [142], la description du Timed Up and Go laisse certaines incertitudes dans la mise en place du test. Il est dit par exemple que la personne doit se lever et marcher jusqu'à une ligne située à 3 mètres. Dans cette courte description, plusieurs interprétations peuvent être faites : la ligne doit être à 3m des pieds de la chaise, des pieds du sujet ? Le participant doit-il faire demi-tour juste avant la ligne, dessus, juste après ?

Dans un contexte d'incertitude comme celui-ci, la création d'un test modélisé numériquement en réalité virtuelle offrirait une reproductibilité optimale. Des paramètres tels que la distance, les repères visuels, éventuellement sonores, les consignes, la luminosité... seraient parfaitement contrôlés et reproductibles. Laissant quelques facteurs externes non contrôlés comme l'ambiance, la température, la nature du sol ou encore le niveau de familiarité avec l'environnement, plus ou moins difficiles à contrôler selon lieu de passation du test.

b) D'autres « réalités »

D'autres technologies prometteuses sont en développement en parallèle de la réalité virtuelle, posant la question de la durée de vie voire même de l'intérêt de la réalité virtuelle immersive à plus ou moins court terme.

En effet, il existe ce que l'on appelle la réalité augmentée et la réalité mixte. Pour faire simple, la réalité augmentée est la superposition d'une information sur l'environnement réel. C'est ce qu'on peut retrouver sur certaines applications de smartphone. L'appareil filme l'environnement qui est diffusé en direct à l'écran, puis, grâce notamment aux données GPS et boussoles, sont affichées des données sur les alentours comme les restaurants, musées, points d'intérêt etc. L'affichage est actualisé selon l'orientation du téléphone pour une utilisation à 360 degrés. D'autres dispositifs peuvent être éventuellement considérés comme des dispositifs de réalité augmentée, comme Google Glass ou encore l'affichage tête haute (ATH) dans les véhicules (Figure 13). Google Glass se présente sous la forme d'une petite lunette sur une monture classique (reposant sur le nez et les oreilles). Cette lunette affiche des informations sous forme de texte et requiert que l'utilisateur regarde dans le coin supérieur droit pour voir les informations diffusées. Pour l'ATH, il s'agit d'une surface semi transparente sur laquelle

est réfléchi une information comme les consignes GPS, les limitations de vitesse etc. On peut également évoquer la caméra de recul dans les véhicules puisque certains modèles affichent également, superposée à l'environnement filmé, la trajectoire du véhicule en fonction de l'orientation des roues. Elle est souvent modélisée par deux courbes de différentes couleurs avertissant du risque de collision en fonction de la distance. Un tel système repose sur la constance du point de vue par rapport au véhicule puisque la position et l'orientation de la caméra est soit fixe soit connue pour le cas où elle doit être déployée.



Figure 13 : Dispositifs de réalité augmentée, Google Glass (à gauche), ATH d'un véhicule (à droite)

La réalité augmentée n'est certainement qu'une étape transitoire vers la réalité mixte, qui nécessite une technologie plus mûre et des développements complexes.

La réalité mixte consiste également à superposer à l'environnement réel (visible) un environnement visuel virtuel. La différence avec la réalité augmentée réside dans l'analyse de l'environnement réel et de sa prise en compte pour l'affichage virtuel. Un des constructeurs présents sur ces développements est Microsoft qui a proposé jusqu'ici deux itérations du casque HoloLens. Lors d'une démonstration, Microsoft a notamment présenté le jeu Minecraft en réalité mixte. Une table présente sur l'estrade a été prise en compte par le dispositif pour y afficher le jeu. L'utilisateur pouvait alors tourner autour et visualiser la scène en 3D en changeant naturellement de point de vue (Figure 14). Ainsi, la réalité mixte permettrait de définir des zones, des surfaces d'affichage et de les utiliser pour afficher n'importe quel type d'information visuelle. Par exemple, il est possible d'utiliser un mur dans un bureau ou à domicile et de choisir d'y afficher la télévision, des prévisions météo, la bourse... On peut également choisir d'afficher, non plus sur une surface, mais dans une zone (volume) et proposer, par exemple, un jeu en 3 dimensions qui va nécessiter des déplacements. Des applications collaboratives de conception, ingénierie, architecture, sont également possibles, en présentiel voire à distance.



Figure 14 : Exemple de l'utilisation du jeu Minecraft avec le dispositif de réalité mixte HoloLens de Microsoft pour projeter l'environnement virtuel du jeu sur différents mobiliers de salon réels (sol, table basse, canapé, étagère).

Cette technologie en développement connaît actuellement certaines limites qui seront sans aucun doute comblées dans les années avenir. Par exemple, pour poursuivre sur le casque HoloLens, la zone d'affichage pour l'environnement virtuel est plutôt réduite, ce qui nécessite impérativement d'orienter le casque sur la zone réelle prévue pour l'affichage et les objets virtuels peuvent rapidement passer hors champ. Le verre légèrement teinté a tendance à obscurcir l'environnement réel, ce qui ne facilite pas l'utilisation dans un environnement déjà sombre. De plus, le dispositif a été conçu pour être autonome, c'est-à-dire qu'il possède en son sein à la fois la technologie d'affichage, d'analyse de l'environnement réel, de calcul et d'énergie. Ainsi, on peut donc attendre de nombreuses évolutions dans la puissance de calcul et l'autonomie du casque. Pour les interactions, le casque fonctionne actuellement avec la voix et les gestes. Les gestes se limitent à des mouvements et formes relativement simples telles que pincer, fermer le poing etc. On espère des évolutions dans la finesse des gestes reconnus. La réalité mixte semble être l'étape la plus prometteuse à ce jour dans le domaine du numérique puisqu'elle n'isole pas totalement l'utilisateur de son environnement physique comme le fait la réalité virtuelle (visiocasques) actuellement et elle enrichit l'environnement physique d'éléments virtuels de manière semi-cohérente. Début 2020, HTC annonce la possibilité d'une modularité de son visiocasque Cosmos, puisqu'une nouvelle façade devrait voir le jour incluant deux nouvelles caméras capables de faire de la réalité augmentée voire mixte. Cependant, la réalité mixte ici passerait par l'affichage de l'environnement réel filmé dans le visiocasque pour y surimprimer des éléments virtuels. La complexité d'un tel système est d'offrir à l'utilisateur

un point de vue équilibré en faisant appel à deux caméras placées en avant de son visage et ainsi proposer une expérience moins déroutante. Pour avoir essayé cette fonction sur le Samsung Gear VR utilisant la caméra du smartphone pour afficher l'environnement réel, l'écart de point de vue s'est révélé être quelque peu perturbant.

2.2.7. L'importance du choix technologique

A l'heure actuelle la réalité virtuelle mérite d'être intégrée dans la recherche. Toutefois, les choix technologiques doivent être faits en fonction des coûts, des usages et du niveau de maturité des dispositifs. Or, on remarque que toutes ces technologies sont très inégales sur ces points précis. Pour schématiser sur ce triptyque des différentes technologies abordées, on retrouve le Cave comme une technologie plutôt mûre et intéressante pour des applications dans des espaces restreints avec le bénéfice d'une vision de son propre corps, toutefois il est coûteux et pas totalement immersif. Les technologies de réalité augmentée sont très limitées et ne prennent que trop peu en compte l'environnement réel pour être prises en considération dans ce triptyque. Les technologies de réalité mixtes sont coûteuses, principalement au niveau développement et manquent pour le moment de maturité. En revanche, elles présentent un fort potentiel pour l'avenir lorsque les visiocasques (réalité virtuelle) atteindront leurs limites, notamment par l'isolement.

Aujourd'hui ce sont donc les visiocasques qui offrent le plus d'avantages autour de thématiques de recherche puisqu'on maîtrise plutôt bien les environnements virtuels et les technologies pour combler l'isolement par la modélisation virtuelle des mouvements des segments corporels. Pour le coût, l'ouverture au grand public et les développements qui l'accompagnent règlent le problème.

Aujourd'hui, c'est la réalité virtuelle immersive utilisant un visiocasque qui présente le plus d'avantages pour l'évaluation du risque de chute. Cette technologie présente une maîtrise totale de l'environnement numérique et une forte reproductibilité. La conception d'un test d'évaluation du risque de chute en réalité virtuelle permettrait de proposer à tous les participants rigoureusement le même test. Celui-ci pourrait aussi être enrichi avec un environnement plus représentatif de la vie quotidienne qu'un couloir d'hôpital ou un cabinet médical. L'enrichissement de l'environnement virtuel peut aussi associer des obstacles immobiles, mobiles, un mouvement etc. eux aussi parfaitement maîtrisés par l'ordinateur.

2.2.8. Limites des visiocasques

a) Technologie

Les technologies des visiocasques évoluent sans cesse puisqu'il s'agit du dispositif le plus vendu dans le domaine de la réalité virtuelle ; cependant, pour des contraintes techniques, de coût ou d'accessibilité, les casques grand public souffrent de quelques limitations : l'affichage en termes de résolution, de fréquence et de champ de vision.

Pour la résolution, elle dépend de la distance du dispositif d'affichage par rapport à l'œil, en effet, une comparaison effectuée par Steven LaValle avec la technologie d'Apple sur les écrans « Retina » suggère qu'une personne avec une vue dite normale (20/20) pourra tout juste distinguer les lignes horizontales de la lettre « E » du tableau de Snellen à 6.09m (considérant qu'elle fixe la lettre, utilisant les photorécepteurs de la fovéa). Les lettres situées sur la ligne 20/20 ont une hauteur correspondant à un angle de 30 secondes d'arc, soit une hauteur de $1/12^{\text{ème}}$ de degré. La trigonométrie permet ainsi d'évaluer quelle taille devrait avoir la lettre « E » en fonction de sa distance avec l'œil pour toujours correspondre à la ligne 20/20. Ainsi, pour un visiocasque dont l'affichage est d'une part placé proche de l'œil (environ 1.5 pouces) et d'autre part agrandi à l'aide de lentilles, la densité de pixels nécessaire pour satisfaire la vue normale devrait être d'au moins 2291 pixels par pouce² (PPI). Pour des personnes ayant une vue avec 60 secondes d'arc, cette résolution devrait doubler pour atteindre 4582 PPI. A titre de comparaison, le casque HTC Vive dispose d'une densité de pixels de 448 PPI et le Vive Pro de 615 PPI. Selon le même raisonnement, Philippe Fuchs s'intéresse aux pixels nécessaires non plus en densité mais sur l'étendue du champ de vision, il propose ainsi 12 600 pixels en horizontal pour un angle de 210° et 8 400 pixels en vertical pour un angle de 140° , pour une acuité visuelle moyenne d'une minute d'angle. Ce qui donne un total de 105 840 000 pixels. Aujourd'hui, la limite est technologique car l'augmentation de la densité de pixels par pouce impose une miniaturisation des pixels et l'augmentation de leur nombre requiert plus de puissance de calcul pour l'affichage. Toutefois, en Novembre 2019 est commercialisé le Visiocasque Varjo VR-2 Pro avec une résolution de 60 pixels par degré soit plus de 3 000 pixels par pouce. La limitation de la densité de pixels limite également le champ de vision. LaValle explique que l'angle du champ de vision avec les mouvements des yeux approche 270° ; or, il serait impossible d'atteindre une telle valeur avec un seul écran plat même en le rapprochant encore ($<180^{\circ}$). Encore une fois, à titre de référence, le HTC Vive propose un champ de vision de 110° . La société Star VR, moins connue du grand public, propose un visiocasque disposant d'un champ de vision de 210° en horizontal et de 130° en vertical. Cet angle est permis par l'utilisation de deux écrans, toutefois, les récents développements d'écrans incurvés voire

pliables/enroulables laissent espérer de nouvelles solutions pour améliorer l'angle de vue. La fréquence d'affichage est ce qui permet de percevoir un mouvement ; à partir de 2 ips un effet stroboscopique de mouvement apparaît, toutefois le mouvement est perçu comme saccadé, il faut donc augmenter le taux de rafraîchissement pour fluidifier la perception du mouvement.

Parmi les fréquences couramment utilisées pour l'affichage, on retrouve les vieux films en 16 ips, les films projetés en salle de cinéma à 24 ips, la télévision en 25 ou 30 images par secondes avant entrelacement et en 50 ou 60 ips après entrelacement. Les casques de réalité virtuelle, eux, ont généralement une fréquence d'affichage de 90 ips. Toujours d'après LaValle, cette fréquence permettrait d'enlever l'inconfort dû au scintillement. Le maintien de cette fréquence d'affichage est donc primordial pour conserver un niveau de confort suffisant. Cependant, l'affichage à une telle fréquence nécessite une puissance de calcul suffisante pour traiter une image dont la taille dépend de sa résolution et le contenu, du calcul des textures, ombrages et autres effets puis l'enchaînement avec une autre image nécessitant elle aussi ces calculs. Les concepteurs des visiocasques doivent donc trouver un compromis, comme il en a toujours existé notamment dans le domaine du jeu vidéo, entre qualité et fréquence d'affichage avec les ressources des processeurs qui ne sont pas illimitées.

On retrouve dans ces exemples les principales contraintes techniques qui limitent les performances actuelles des casques.

b) Ergonomie

Parmi les limites des visiocasques on retrouve également des contraintes liées à l'ergonomie. Les visiocasques ont évolué depuis les premiers casques grand public, en particulier par leurs systèmes de fixation, passant ainsi de sangles velcros réglables sur les côtés et le dessus du crâne à des systèmes rigides réglables à la fois par velcro et à l'instar du casque de cyclisme avec une molette permettant d'ajuster le serrage de l'arceau. Le type d'arceau est également important et se différencie par les zones du crâne sur lesquelles il appuie. Ainsi, on va avoir des arceaux partiels qui partent du casque, entourent la tête pour revenir au casque et des arceaux complets qui vont entourer le crâne et sur lesquels va venir se fixer le dispositif d'affichage. Tous ces différents systèmes de fixation modifient l'ergonomie des casques et plus particulièrement la répartition de la masse. Les sangles, par exemple, ont tendance à simplement maintenir le casque devant le visage, ce dernier reposant alors en partie sur les pommettes. Les arceaux partiels sont liés aux casques qui viennent reposer sur les pommettes également, tandis que l'arceau complet va entourer le crâne, le dispositif d'affichage ne repose plus sur le visage et peut être relevé comme il est possible de le faire avec un masque de soudure ou la visière

d'un casque de moto. Il est à noter que la masse des visiocasques est, pour la majorité des modèles, répartie sur l'avant puisque c'est là qu'est placé le dispositif d'affichage. A ce dispositif, s'ajoutent aujourd'hui sur les modèles sans fil, autonomes ou avec un tracking inside-out, des dispositifs de captation de l'environnement (plusieurs caméras), des dispositifs de calcul (processeur) et des dispositifs d'alimentation (batterie). Ces éléments sont susceptibles d'ajouter de la masse à l'ensemble d'autant qu'ils sont souvent disposés à l'avant du visiocasque. Ces ajouts sont des sources de chaleur qui nécessitent parfois l'ajout d'un système de ventilation pour protéger le système et améliorer le confort de l'utilisateur. La répartition de la masse sur la tête pourrait avoir une influence sur la mobilité cervicale et les informations proprioceptives par exemple des muscles de la nuque [187, 204, 205, 206, 207, 208].

c) Cinétose

La cinétose en réalité virtuelle, aussi appelée cybermalaise ou cybersickness, va résulter le plus souvent d'un conflit sensoriel. La discordance entre les informations sensorielles de deux ou plusieurs sources génère des fatigues oculaires, maux de tête, pâleur, transpiration, sécheresse de la bouche, désorientation, vertiges, ataxie, nausées voire vomissements [209, 210, 211, 212]. En réalité virtuelle immersive, utilisant un visiocasque, la vue et le son étant simulés, il est tout à fait possible de créer un conflit vestibulo-oculaire en simulant un environnement incohérent avec les informations d'accélération détectées par le système vestibulaire. En réalité virtuelle, ce sont essentiellement les déplacements visuellement simulés qui vont être en conflit avec des informations discordantes en provenance du système vestibulaire. C'est globalement l'inverse de ce qu'on observe en mal des transports où un support visuel fixe va contraster avec les mouvements/accélération du véhicule dans lequel on se trouve. C'est pour cette raison que les visiocasques doivent avoir un tracking spatial à la fois fiable et réactif. L'idée est d'avoir la meilleure fidélité possible en termes de position et de localisation, avec une retranscription rapide dans l'environnement virtuel. Un décalage spatial et/ou temporel aurait des conséquences sur la perception et pourrait rendre malades les utilisateurs. Les récents développements de solutions d'inside-out tracking, utilisant les caméras du casque pour le localiser et en partie l'orienter (en plus des accéléromètres et centrales inertiels), et dont l'objectif est de pouvoir s'affranchir des balises extérieures, nécessitent probablement des améliorations, certains retours utilisateurs mettant en cause des défauts dans le tracking, notamment en environnement sombre. Ce type de défaut peut rapidement devenir préjudiciable à l'expérience utilisateur, surtout pour des personnes sensibles au mal de transport et à l'équilibre précaire, mais aussi pour la sécurité.

Parmi les réglages possibles sur les casques de réalité virtuelle on trouve la distance lentilles/yeux et l'écart pupillaire, ces deux paramètres, selon l'amplitude accordée par le réglage assure une stéréoscopie confortable à la plupart des morphologies. Malgré cela, un autre conflit sensoriel existe avec les visiocasques, il s'agit d'un conflit d'accommodation-vergence. Les informations proprioceptives des muscles oculomoteurs contrôlant l'orientation des yeux et donc de l'angle de vergence vont être en conflit avec les informations proprioceptives de l'œil permettant l'accommodation. L'accommodation permet à l'œil d'ajuster la vision en fonction de la distance de la cible tandis que la vergence donne une vision binoculaire en orientant les deux yeux vers la cible. Or, avec un visiocasque, si pour regarder un élément virtuel éloigné, on oriente effectivement les yeux vers la cible, l'accommodation, elle, est faite par rapport à la distance du dispositif d'affichage. On comprend alors que la vergence vers des éléments éloignés va entrer en conflit avec l'accommodation en affichage rapproché.

L'inclinaison de la tête sur un côté dans une faible amplitude peut générer un conflit car les yeux sont capables de compenser l'inclinaison de la tête selon les informations vestibulaires et plus précisément des canaux semi-circulaires lors du mouvement ainsi que les organes otolithiques en statique (ocular counterrolling reflex). Les yeux dans le sens opposé pour offrir tant bien que mal une image verticale [213]. L'image visible doit alors être cohérente par rapport à l'inclinaison de la tête et l'image affichée. Le phénomène dépend essentiellement de l'angle d'inclinaison de la tête. Avec des indices visuels, une inclinaison de la tête de 15° génère en moyenne une torsion d'environ 2.5°, pour 30° une torsion de 4.7° et pour une inclinaison de 45° une torsion oculaire de 5.9° [214].

L'environnement virtuel devient source de malaise quand l'utilisateur recherche des références connues dans le monde qui l'entoure ; or la physique d'un environnement virtuel est créée avec ses propres contraintes, limites et potentialités différentes du monde réel.

Les limites de champ de vision vues précédemment peuvent partiellement recouvrir la vision périphérique or, elle est utilisée pour se déplacer dans l'environnement virtuel avec un support visuel fixe [184, 215].

2.2.9. Le sentiment de Présence

a) Définition

Introduite par Minsky en 1980 sous le terme de Telepresence, la présence est le sentiment « d'y être », dans un environnement médié [216]. D'après Bouvier, dont la thèse s'intéresse à la présence en réalité virtuelle [217], il y aurait une définition de la présence proposée par Lombard et Ditton qui fait consensus : « perceptual illusion of non mediation » [218, 219].

b) Les cinq piliers

Bouvier décrit 5 piliers favorisant le sentiment de présence :

- L'**immersion** consiste en la stimulation sensorielle de l'utilisateur pour qu'il perçoive l'environnement virtuel. Dans l'immersion, il faudrait ne pas confondre réalisme et crédibilité dans le sens où l'utilisateur se sent présent s'il est entraîné dans l'expérience virtuelle.
- L'**interaction**, comme déjà abordé précédemment, doit être aussi transparente et naturelle que possible.
- La **cohérence de la boucle perception-action**, est permise notamment par de faibles (imperceptibles ?) latences du système et des actions-réactions cohérentes.
- L'**émotion** consisterait à éviter de laisser pénétrer les distractions provenant du monde réel.
- Enfin, les **sciences cognitives** vont faire du lien entre les autres piliers dans une expérience centrée sur l'utilisateur pour lui permettre de se sentir présent dans l'environnement virtuel [219].

c) Slater

Dans les années 90-2000, Mel Slater a publié quelques articles dans lesquels il tente d'améliorer le sentiment de présence en proposant des améliorations de la réalité virtuelle. Ces travaux ont évidemment pour limite la technologie employée à l'époque mais offrent une vision intéressante de ce qui peut jouer sur « l'impression » d'y être. En 1995, son équipe et lui remarquent que marcher sur place pour « avancer » dans l'environnement virtuel renforce le sentiment de présence en comparaison avec des tâches de pointage avec la main [220]. En 1995 toujours, ils évaluent l'effet des ombres sur le sentiment de présence, arrivant à la conclusion que les ombrages dynamiques dans l'environnement virtuel, s'ils n'améliorent pas perception de la profondeur, ils renforcent néanmoins le sentiment de présence [221]. Lors d'une tâche de mémorisation et de reproduction aux échecs, ils testent la performance en exo et ego centrique dans des environnements plus et moins réalistes, suggérant de meilleures performances avec un sentiment de présence renforcé par le réalisme et un point de vue egocentrique [222].

Des échanges avec Witmer and Singer, considérant la présence comme l'expérimentation d'être dans un endroit tout en étant physiquement présent dans un autre ou encore être plutôt entraîné dans l'environnement virtuel plutôt que le réel, conduisent à « L'immersion est un état psychologique caractérisé par la perception de soi, enveloppée par, incluse dans et interagissant avec un environnement qui procure un flux continu de stimuli et d'expériences. ». Cet échange

débouche sur la critique du questionnaire proposé par Witmer and Singer pour l'évaluation du sentiment de présence jugé trop subjectif [223, 224]. Une distinction importante est faite entre le concept d'immersion et celui de présence où l'immersion serait objectivement quantifiable tandis que la présence serait subjective [225].

d) iGroup Presence Questionnaire (Annexes p.165)

Ce questionnaire proposé par Schubert en 2001 [225] évalue le sentiment de présence avec 14 questions réparties sur 4 items. Chaque question propose une échelle allant de -3 à +3 où -3 représente un faible niveau de présence et +3 un haut niveau de présence à l'exception de 3 questions (une dans chacun des items qui comportent plusieurs questions) qui sont posées de manière inversée. Les scores à ces trois questions nécessitent de changer de signe pour le traitement des données.

Dans ce questionnaire, une question générale demande littéralement : Dans le monde généré par l'ordinateur, j'ai eu le sentiment "d'y être". Les autres questions constituent les items Implication (Involvement - INV), Présence Spatiale (Spatial Presence - SP) et Réalisme (Realism - REAL). L'implication quantifie le niveau d'attention dédié à l'expérience virtuelle (vs. monde réel), la présence spatiale renvoie au sentiment d'être physiquement présent dans l'environnement virtuel et le réalisme évalue le caractère crédible de l'expérience.

Ce questionnaire fait la synthèse d'autres questionnaires de présence comme celui Witmer et Singer (1998) [223] ou celui de Lessiter *et al.* (2001) [226] en ajoutant la question générale évaluant la présence de manière directe et aussi une composante d'action (« ...j'ai eu la sensation d'agir dans l'espace virtuel... ») [217].

III. Objectifs et hypothèses

Si les tests sur l'équilibre et le risque de chute semblent relativement pertinents pour la détection du risque de chute sur un collectif particulier, ils manquent quelque peu de sensibilité et de spécificité pour des individus qui s'éloignent peu ou prou des groupes testés. Pour pallier ces défauts pouvant conduire à des faux négatifs, nous nous sommes demandé ce que pourrait apporter la réalité virtuelle dans le dépistage d'un risque de chute. A notre connaissance, les technologies de réalité virtuelle immersive n'ont pas encore vraiment été utilisées à des fins d'évaluation si ce n'est pour la virtualisation de tests ou d'outils spécifiques aux activités de kinésithérapie vestibulaire. Leur usage, à l'instar des technologies ludiques non immersives précédentes, serait plutôt dédié à la réadaptation et au maintien ou à la reprise d'activité physique.

Nous avons montré que cette technologie peut contextualiser les tests, en apportant un environnement plus proche de la vie courante, mais aussi une uniformité qui parfois fait défaut aux tests couramment utilisés.

Nous avons alors mené quatre études qui s'articulent autour de trois parties :

- la première partie, basée sur une étude, cherche à connaître l'impact de la technologie (visiocasque) sur le comportement moteur ainsi que le sentiment de présence,
- la deuxième, basée sur une étude, vise à évaluer l'impact du scénario sur ce même comportement moteur
- la troisième partie, basée sur deux études, focalise sur l'impact des facteurs individuels et plus particulièrement l'âge sur le comportement moteur et le sentiment de présence.

Etude #1 : (Publiée dans Plos One [227])

Impact of using immersive virtual reality over time and steps in the Timed Up and Go test in elderly people.

**Frédéric Muhla^{1,2}, Fabien Clanché^{1,2}, Karine Duclos^{1,2}, Philippe Meyer³,
Séverine Maïaux³, Sophie Colnat-Coulbois², G erome C. Gauchard^{1,2}**

¹UFR STAPS, Faculty of Sport Science, Universit e de Lorraine, 30 rue du Jardin Botanique, CS 30156, 54603 Villers-l es- Nancy, France

²EA 3450 DevAH, Development, Adaptation and Handicap, Faculty of Medicine, Universit e de Lorraine, CS 50184, 54505 Vand euvre-l es-Nancy

³OHS Centre Florentin, 2 Rue des Cinq-Piquets, 54022 Nancy

L'objectif de cette première étude était d'évaluer le comportement moteur dans une tâche locomotrice r el e en réel et en virtuel avec un visiocasque et d'analyser la corrélation avec le sentiment de présence. Une hypothèse serait que l'environnement enrichi virtuellement aurait un effet discriminant sur les paramètres spatio-temporels du Timed Up and Go en lien avec l'immersion, effet qui serait plus important avec un sentiment de présence accru.

Etude #2 : (en révision dans Gerontology)

Does the management of visual and audible motion information during an immersive virtual reality Timed Up & Go test impact locomotor performance in the elderly?

**Frédéric Muhla^{1,2}, Karine Duclos^{1,2}, Fabien Clanch ^{1,2}, Philippe Meyer³,
Séverine Ma iaux³, Sophie Colnat-Coulbois², G erome C. Gauchard^{1,2}**

¹UFR STAPS, Faculty of Sport Science, Universit e de Lorraine, 30 rue du Jardin Botanique, CS 30156, 54603 Villers-l es- Nancy, France

²EA 3450 DevAH, Development, Adaptation and Handicap, Faculty of Medicine, Universit e de Lorraine, CS 50184, 54505 Vand euvre-l es-Nancy

³OHS Centre Florentin, 2 Rue des Cinq-Piquets, 54022 Nancy

L'objectif de cette deuxième étude était d'évaluer le comportement moteur sur la même tâche locomotrice en réel et en réalité virtuelle immersive lorsque l'environnement virtuel est immobile et lorsqu'il donne une information visuelle et sonore de mouvement. Une hypothèse serait qu'il y aurait une variation des paramètres spatio-temporels du Timed Up and Go entre les conditions en réel et en réalité virtuelle, mais un impact modéré de l'information de mouvement entre les deux conditions en réalité virtuelle.

Etude #3 : (en soumission)

Is young adults motor control as affected as for elders using immersive virtual reality?

**Alexandre Renaux^{1,2}, Frédéric Muhla^{1,2}, Fabien Clanché^{1,2}, Philippe Meyer³, Séverine Maïaux³, Karine Duclos^{1,2}, Sophie Colnat-Coulbois²,
Gérome C. Gauchard^{1,2}**

¹*UFR STAPS, Faculty of Sport Science, Université de Lorraine, 30 rue du Jardin Botanique, CS 30156, 54603 Villers-lès- Nancy, France*

²*EA 3450 DevAH, Development, Adaptation and Handicap, Faculty of Medicine, Université de Lorraine, CS 50184, 54505 Vandœuvre-lès-Nancy*

³*OHS Centre Florentin, 2 Rue des Cinq-Piquets, 54022 Nancy*

L'objectif est de déterminer si les observations faites lors de la précédente étude sont dues à un effet d'âge en comparant ici une population de jeunes adultes à des personnes âgées sur la motricité en réel et en réalité virtuelle. Une hypothèse serait que l'effet « Réalité Virtuelle » puisse être commun aux deux populations et par conséquent que l'effet de l'âge soit limité pour les paramètres spatio-temporels du Timed Up and Go en réalité virtuelle par rapport au réel. Toutefois il est possible que dans une condition supposément plus complexe avec du mouvement, l'effet de l'âge impacte les résultats.

Etude #4 : (en soumission)

Age impact on presence feeling in immersive virtual reality.

**Frédéric Muhla^{1,2}, Alexandre Renaux^{1,2}, Karine Duclos^{1,2}, Fabien Clanché^{1,2}, Philippe Meyer³, Séverine Maïaux³, Sophie Colnat-Coulbois²,
Gérome Gauchard^{1,2}**

¹*UFR STAPS, Faculty of Sport Science, Université de Lorraine, 30 rue du Jardin Botanique, CS 30156, 54603 Villers-lès- Nancy, France*

²*EA 3450 DevAH, Development, Adaptation and Handicap, Faculty of Medicine, Université de Lorraine, CS 50184, 54505 Vandœuvre-lès-Nancy*

³*OHS Centre Florentin, 2 Rue des Cinq-Piquets, 54022 Nancy*

Correspondence should be addressed to Gérome Gauchard; gerome.gauchard@univ-lorraine.fr

L'objectif de cette étude était de comparer le sentiment de présence perçu par des personnes âgées comparativement à de jeunes adultes dans une expérience virtuelle équivalente. Une hypothèse serait que l'expérience vidéo ludique et technologique des jeunes adultes soit plus importante et actuelle que celle des personnes âgées et qu'ils soient simplement moins impressionnés et par conséquent aient un sentiment de présence plus faible que les participants âgés.

IV. Participants, Matériel et Méthode

4.1. Participants

Pour ces quatre études, nous avons fait appel à un panel de participants âgés et de jeunes adultes dont les caractéristiques détaillées apparaissent juste avant les résultats de chacune des quatre études. Les personnes âgées ont été recrutées au centre de réadaptation OHS Florentin à Nancy et étaient toutes à la fin de leur programme de rééducation-réadaptation. Aucune n'avait chuté l'année précédant le test et leur réadaptation faisait globalement suite à des chirurgies de type implantation de prothèses de hanche, genou ou épaule. Comme a pu l'affirmer Podsiadlo dans la description du Timed Up and Go, les aides à la marche étaient acceptées (#1 et #4 : 9 utilisaient une canne et 7 une canne anglaise ; #2 : 9 utilisaient une canne et 17 une canne anglaise ; #3 : 8 utilisaient une canne et 14 une canne anglaise). Aucun des participants n'avait eu l'occasion d'utiliser un visiocasque auparavant.

Les jeunes adultes ont été recrutés en leur qualité d'étudiants à l'Université de Lorraine dont une majorité provenait de la Faculté des Sciences du Sport de Nancy ; aucun n'avait chuté hors d'une activité spécifique ou sportive ni n'avait utilisé de visiocasque autorisant des déplacements auparavant.

Tous les participants ont donné leur consentement oral pour participer à ces études et les données ont été intégralement traitées et présentées de manière anonyme. Les quatre études menées s'intègrent dans le protocole validé par le « Comité de Protection des Personnes Grand Est III » (n°2018-A02637-48).

4.2. Tâche

La tâche à effectuer se prête relativement bien à l'utilisation de la réalité virtuelle et offre plusieurs actions locomotrices : il s'agit d'un Timed Up and Go. Le Timed Up and Go n'est pas utilisé ici en tant que test sur le risque de chute puisque nous ne comparons pas les résultats aux normes en vigueur, mais comme prétexte pour faire exécuter aux participants une tâche dans laquelle ils doivent effectuer un lever de chaise, de la marche, des demi-tours et une assise. Considérant que ces actes moteurs constituent une base intéressante à mettre à l'épreuve en réalité virtuelle dans un premier temps, nous avons utilisé les instructions fournies par Podsiadlo [142] pour l'exécution de la tâche, à savoir :

Le participant est assis sur une chaise avec une assise à environ 46 cm de hauteur, le dos contre le dossier et les avant-bras sur les accoudoirs ; aide à la marche en main le cas échéant.

Les deux pieds sont au sol et l'expérimentateur donne un signal de départ au participant qui doit se lever de la chaise pour ensuite marcher vers une ligne située à 3 mètres, faire demi-tour et retourner s'asseoir sur la chaise.

Cette tâche locomotrice peut être découpée en différentes phases consécutives auxquelles nous attribuons des niveaux de difficultés échelonnés. Les différentes phases sont « se lever », « aller », « demi-tour », « retour », « s'asseoir ». Ces phases constituent des actions motrices mettant en jeu des capacités variées plus ou moins complexes et difficiles. L'échelonnement de la difficulté se répartit sur trois niveaux de difficulté. Les deux phases de marche représentent les actions motrices les plus simples, les plus automatisées et sans contrainte extérieure, elles sont probablement les moins déstabilisantes. En second plan, on retrouve « se lever » et « demi-tour ». Bien que différentes, nous les qualifions de difficulté intermédiaire comparativement à la dernière action. La phase « se lever » requiert, en effet, une mobilisation musculaire importante pour élever le centre de gravité jusqu'à la posture érigée. Cette action nécessite cependant un faible maintien de l'équilibre postural antéro-postérieur car elle est directement suivie de la première phase de marche. Le « demi-tour » va demander une adaptation pour effectuer la transition depuis la première phase de marche vers un changement de direction à 180°. Ce changement de direction nécessite une prise d'informations à la fois visuelles, proprioceptives et vestibulaires afin d'assurer le maintien de l'équilibre et la dissociation entre les ceintures scapulaire et pelvienne pour effectuer la rotation. Selon le degré d'aptitude, les participants ont tendance à moduler la technique en utilisant soit un pivot soit des pas. La fin de cette phase repart sur la seconde phase de marche (« retour »). La dernière phase, certainement la plus complexe, est la phase « s'asseoir ». En effet elle requiert d'orienter le corps dans le bon sens pour s'asseoir ainsi qu'un tonus musculaire suffisant pour contrôler la descente du centre de gravité et éviter de se laisser tomber sur la chaise. Pour découper le Timed Up and Go en phases consécutives, nous avons associé le demi-tour qui oriente le corps par rapport à la chaise avec l'assise elle-même, juste après la seconde phase de marche. En effet, selon le niveau de mobilité des participants, on va observer globalement deux manières de procéder :

- Soit, les personnes séquentent le demi-tour et l'assise ; elles vont donc pivoter (plusieurs pas ou un pivot) puis abaisser leur centre de gravité pour s'asseoir sur la chaise.
- Soit, elles associent les deux actions pour les exécuter de manière quasi-simultanée, c'est-à-dire qu'elles vont amorcer la descente du centre de gravité durant le demi-tour.

Il est donc préférable de considérer l'assise comme une action globale regroupant l'orientation du corps et l'assise effective pour le découpage [228].

La tâche Timed Up and Go a été réalisée dans plusieurs conditions : en réel et en réalité virtuelle. Chaque condition a fait l'objet d'une familiarisation avec un ou plusieurs essais au besoin. Cette familiarisation a permis de s'assurer de la bonne compréhension des consignes et de la tâche, et aussi aux participants de se familiariser avec la réalité virtuelle, tant pour le matériel (réglages strap, écart inter-pupillaire, avec ou sans lunettes) et l'environnement (visualisation à 360°, déplacements, identification du lieu et des éléments importants de la scène).

Les participants ont effectué 3 essais dans chaque condition. L'ordre de passage des conditions a été randomisé.

4.3. Réalité virtuelle

4.3.1. Matériel

Le système de réalité virtuelle utilisé pour les expérimentations comprend un visiocasque HTC Vive avec une fréquence d'affichage de 90Hz, une résolution de 2 160*1 200 pixels, un champ de vision de 110° pour une masse de 470 grammes. L'ordinateur utilisé est un laptop muni d'un processeur Intel I7 et d'une carte graphique Nvidia GTX 1070, suffisamment puissant pour proposer une expérience virtuelle fluide.

4.3.2. Scénario et environnement virtuels

Pour tester le Timed Up and Go dans un contexte proche de la vie courante avec une solution facilement transportable et déployable en centre de réadaptation, nous avons opté pour un scénario représentant le wagon bar d'un train virtuel. Le scénario développé proposant plusieurs conditions, nous avons choisi de nous concentrer sur les deux premières à savoir : *train à l'arrêt en gare* et *train en marche à vitesse linéaire* (Figure 15). La conception de ce scénario et ses potentialités sont décrites dans le paragraphe 7.1 MéMoSim'S TUG Simulator XX (p.127).

Le premier environnement constitue la condition réalité virtuelle de l'étude #1 et #4. Les études #2 et #3 vont utiliser à la fois le train à l'arrêt et le train en marche comme conditions en réalité virtuelle.

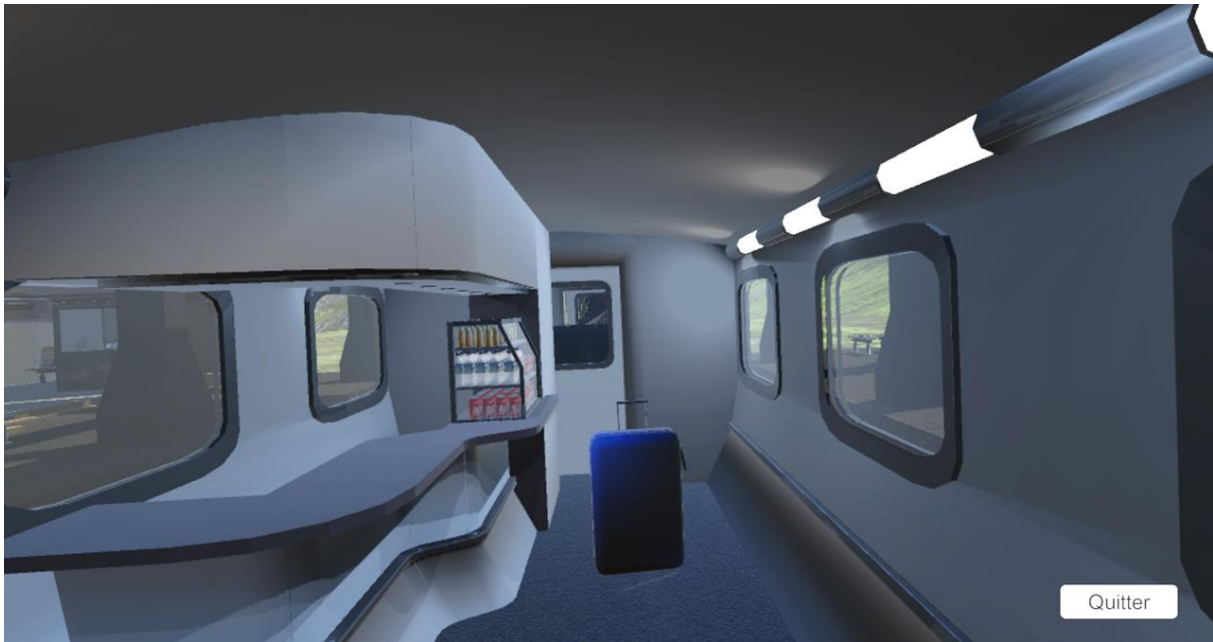


Figure 15 : Aperçu du wagon bar à l'arrêt en gare (vu du visiocasque)

4.4. Métrologie

4.4.1. Temps

Les mesures temporelles données par le découpage automatique des phases dans le logiciel n'étant pas exemptes de défauts, nous avons plutôt opté pour une solution vidéo. Chaque essai a donc été filmé à l'aide d'un téléphone en 1 920*1 080 pixels à une fréquence de 60 images par seconde. Grâce aux films, nous avons découpé les différentes phases du Timed Up and Go. La lecture vidéo a été réalisée avec le logiciel Media Player Classic - Home Cinema, qui offre un affichage de la progression temporelle à 0.001 seconde. A une fréquence de 60Hz, l'intervalle de temps entre 2 images est de 0.016 secondes ; nous avons découpé les phases à l'image la plus proche et présentons les résultats au centième de seconde.

Pour la première étude, j'étais seul pour le traitement des données vidéos, j'ai été rejoint par d'autres personnes lors du traitement des vidéos des études suivantes. Ainsi, pour éviter une variabilité inter-évaluateur dans le traitement des vidéos, le séquençage des différentes phases consécutives du Timed Up and Go a été amélioré entre l'étude #1 et les études #2 et #3 en proposant des repères plus constants et plus facilement identifiables permettant l'autonomie des personnes qui m'ont assisté dans le traitement. Cette amélioration ne modifie pas fondamentalement le découpage mais offre cependant une standardisation plus importante. Voici les deux méthodes qui ont servi au découpage des phases :

- Se lever (#1) : le dos décolle du dossier → hauteur de la tête maximale
- Se lever (#2/3) : le dos décolle du dossier → décolllement du pied pour le premier pas

- Aller (#1) : ... → quand la ligne des épaules commence à pivoter dans le sens du demi-tour
Aller (#2/3) : ... → quand le pied oscillant passe le pied d'appui avant d'être posé pivoté pour commencer le demi-tour [229]
- Demi-tour (#1) : ... → quand les épaules font face à la chaise
Demi-tour (#2/3) : ... → quand le pied oscillant passe le pied d'appui avant d'être posé en direction de la chaise
- Retour (#1) : ... → quand la ligne des épaules commence à pivoter dans le sens du demi-tour
Retour (#2/3) : ... → quand le pied oscillant passe le pied d'appui avant d'être posé pivoté pour commencer le demi-tour [229, 230]
- S'asseoir (#1 - #2/3) : ... → quand le dos est à nouveau collé au dossier

4.4.2. Nombre de pas

Le nombre de pas a été comptabilisé à l'aide de la vidéo également. Il est aussi proposé pour l'intégralité du test ainsi que chacune des phases hormis *se lever*. Les pas sont comptés selon le nombre de pieds posés lors d'une phase. Le découpage ajusté du Timed Up and Go dans les études #2 et #3 a aussi évité des erreurs d'interprétation puisque les phases sont séquencées durant l'oscillation d'une jambe.

4.4.3. Présence

Pour la première et la quatrième étude, le sentiment de présence a été évalué à l'aide du questionnaire IPQ (iGroup Presence Questionnaire) traduit par Isabelle Viaud-Delmon [231] (Annexes p.165).

V. Résultats et discussions spécifiques à chaque étude

Afin de faciliter la lecture et pour chaque étude, les objectifs et hypothèses sont rappelés et la méthodologie spécifique est détaillée ; les résultats sont présentés et aussitôt discutés.

5.1. Abréviations et dénominations anglaises

Ces abréviations et dénominations anglaises sont celles utilisées dans les publications et qui apparaissent notamment dans les figures et tableaux.

- TUG : Timed Up and Go
- Virtual Reality (VR) : Réalité virtuelle
- Virtual Reality in motion (VRm) : Réalité virtuelle en mouvement
- Time : Temps
- Steps : Nombre de pas
- Get Up (GU) : Se lever
- Go : Aller
- Turn Around (TA) : Demi-tour
- Return (Re) : Retour
- Sit Down (SD) : S'asseoir
- Igroup Presence Questionnaire (IPQ) : Questionnaire sur le sentiment de présence
- Spatial Presence (SP) : Présence spatiale
- Involvement (INV) : Implication
- Realism (REAL) : Réalisme
- General question (G) : Question générale

5.2. Etude #1 : Impact of using immersive virtual reality over time and steps in the Timed Up and Go test in elderly people.

5.2.1. Objectifs et hypothèses

L'objectif de cette première étude était d'évaluer le comportement moteur dans une tâche locomotrice réalisée en réel et en virtuel avec un visiocasque et d'analyser la corrélation avec le sentiment de présence. Une hypothèse était que l'environnement enrichi virtuellement aurait un effet discriminant sur les paramètres spatio-temporels du Timed Up and Go en lien avec l'immersion, effet qui serait plus important avec un sentiment de présence accru.

5.2.2. Méthodologie spécifique

Trente et une personnes âgées (20F-11H, 73.7 ± 9 ans) ont participé à ce protocole. Dans cette première étude, nous avons comparé les conditions « réel » et « réalité virtuelle ». Les 3 essais ont été moyennés pour chaque participant. La normalité des données recueillies pour le temps et le nombre de pas a été testée à l'aide d'un W de Shapiro-Wilk. Ne suivant pas la loi normale, les distributions ont été comparées deux à deux avec le test non paramétrique pour échantillons appariés de Wilcoxon. Les données sont présentées sous la forme de médianes et d'écarts interquartiles et le niveau de signification α utilisé est de 5%.

Les résultats au questionnaire sur le sentiment de présence sont présentés sous la forme de médianes et écarts interquartiles des scores allant de -3 à +3. Ces résultats ont été corrélés (Pearson, r) avec les temps et nombres de pas au Timed Up and Go en réalité virtuelle.

Δ_{Time} est la différence entre le temps en condition « Réalité virtuelle » et le temps en condition « Réel », ce Δ_{Time} a été corrélié (Pearson, r) au temps en condition « Réel ».

5.2.3. Résultats

Tableau 4 : Médianes (écarts interquartile) des temps et des nombres de pas pour les conditions "Réel" et "Réalité virtuelle" (VR), pour les différentes phases du Timed Up and Go et le total.

TUG Phase	Time (s)	Time VR (s)	Steps	Steps VR
Get Up (GU)	1.35 (0.48)	1.33 (0.72)		
Go	3.93 (1.75)	4.14 (2.19)	6 (2)	6.67 (2.67)
Turn Around (TA)	1.59 (0.69)	1.88 (1.20)	3 (1.08)	3.33 (1.42)
Return (Re)	3.49 (1.50)	3.63 (2.18)	6 (1.67)	6.33 (1.83)
Sit Down (SD)	2.63 (0.95)	3.02 (1.37)	3 (1.67)	3.33 (1.33)
Total	12.84 (5.56)	14.76 (8.63)	17.16 (4.83)	19.17 (6.5)

a) Temps

La condition « réalité virtuelle » (VR) montre une augmentation du temps pour compléter le Timed Up and Go dans son ensemble ainsi que pour les différentes phases qui le composent à l'exception de *se lever* qui a diminué (Tableau 4 - Figure 16 - Figure 17). On observe des différences significatives pour le temps total ($z = 4.017, p < 0.001$) et les phases du test (Go : $z=3.880, p<0.001$; TA : $z=2.763, p=0.006$; Re : $z=2.567, p=0.010$; SD : $z=3.939, p<0.001$). Pour la phase *se lever*, en « Réalité virtuelle », le temps est significativement inférieur à la condition « Réel » ($z=2.077, p=0.038$).

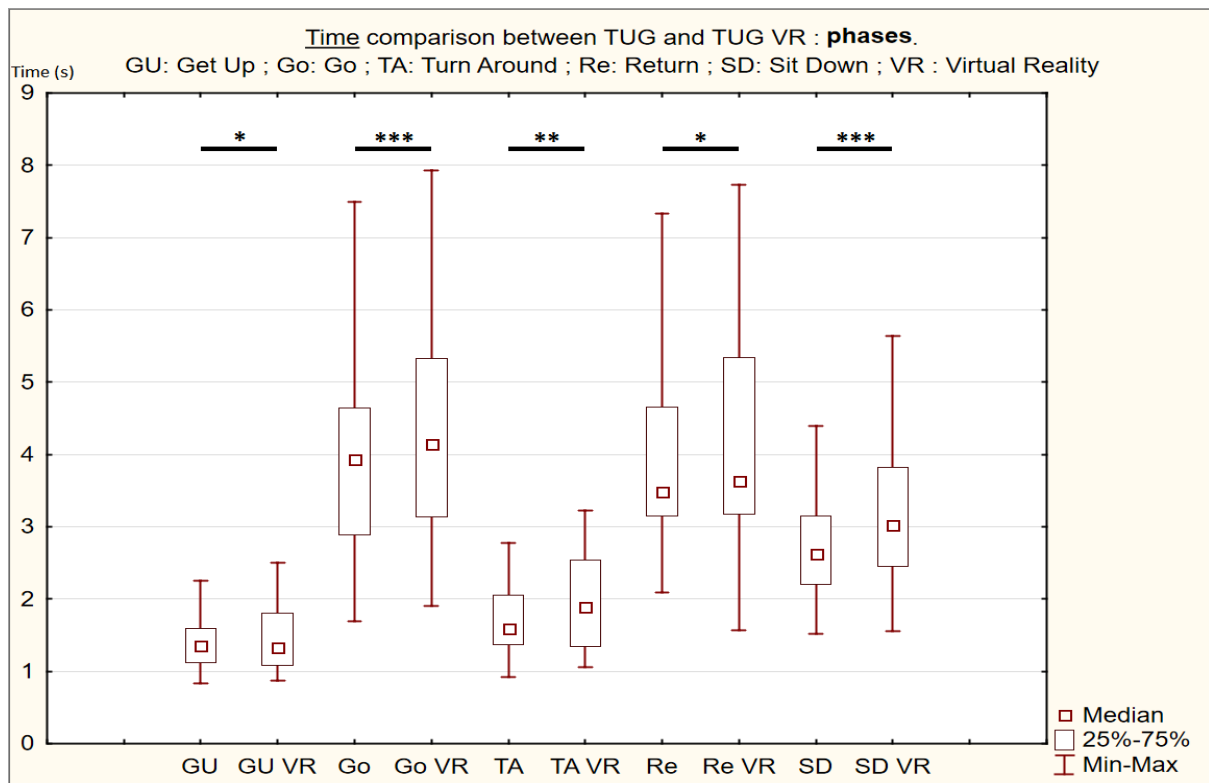


Figure 16 : Boîtes à moustaches représentant les médianes, les quartiles et les minimums et maximums dans les deux conditions "Réel" et "Réalité virtuelle" pour les temps moyens des différentes phases du Timed Up and Go. Test de Wilcoxon : * $p < 0.050$; ** $p < 0.010$; *** $p < 0.001$.

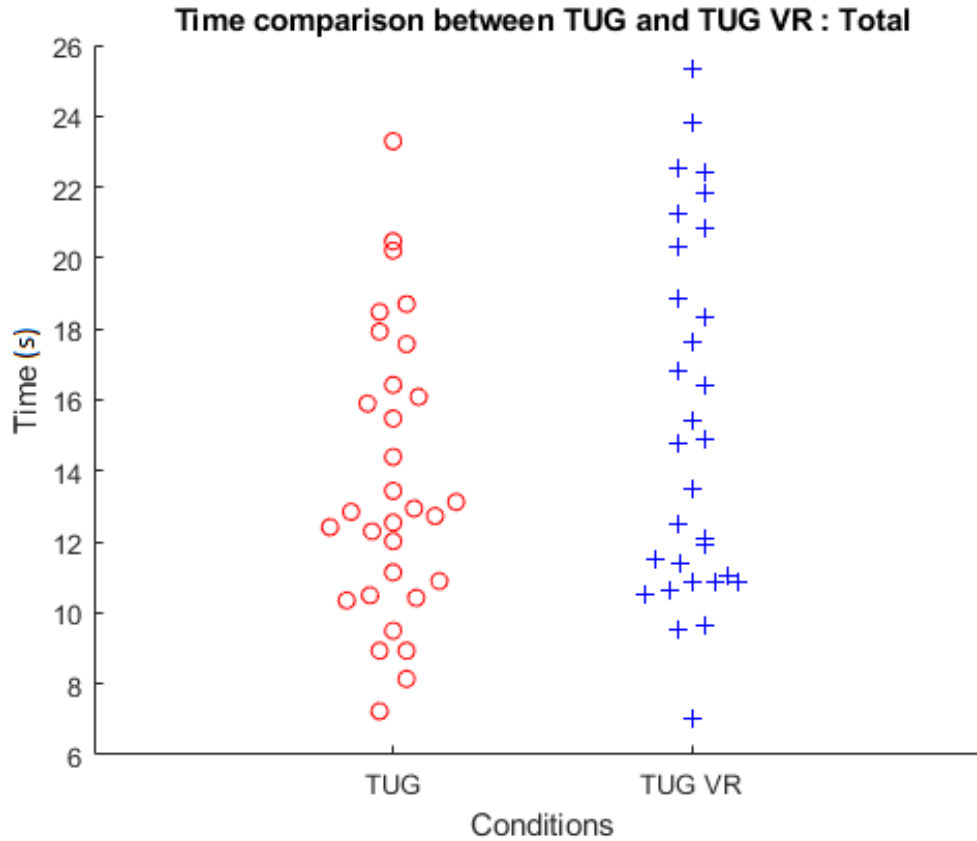


Figure 17 : Graphique en essaim d'abeilles représentant la répartition des temps totaux pour chaque condition ("Réalité virtuelle" et "Réal")

b) Nombre de pas

La condition « Réalité virtuelle » montre également une augmentation du nombre de pas pour la tâche entière ainsi que pour toutes ses phases par rapport à la condition « Réel » (Tableau 4 - Figure 18 - Figure 19). Ces différences observées sont significatives pour le nombre de pas total ($z=4.330$, $p<0.001$) et la plupart des phases du Timed Up and Go (Go: $z=3.829$, $p<0.001$; Re: $z=3.271$, $p=0.001$; SD: $z=2.922$, $p<0.004$). On observe une tendance concernant la phase de *demi-tour* ($z=1.929$, $p=0.068$).

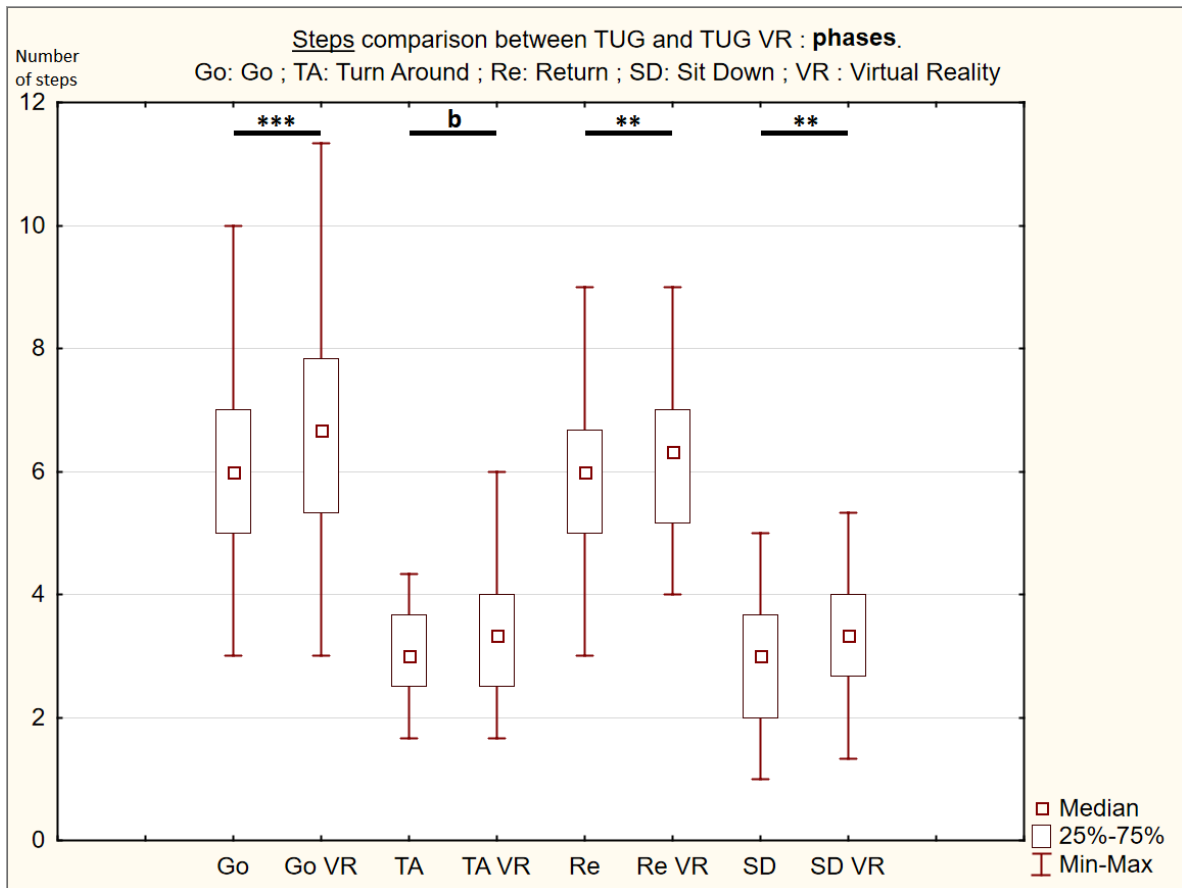


Figure 18 : Boîtes à moustaches représentant les médianes, les quartiles et les minimums et maximums dans les deux conditions "Réal" et "Réalité virtuelle" pour les nombres de pas moyens des différentes phases du Timed Up and Go. Test de Wilcoxon : * $p < 0.050$; ** $p < 0.010$; *** $p < 0.001$; b $p < 0.1$.

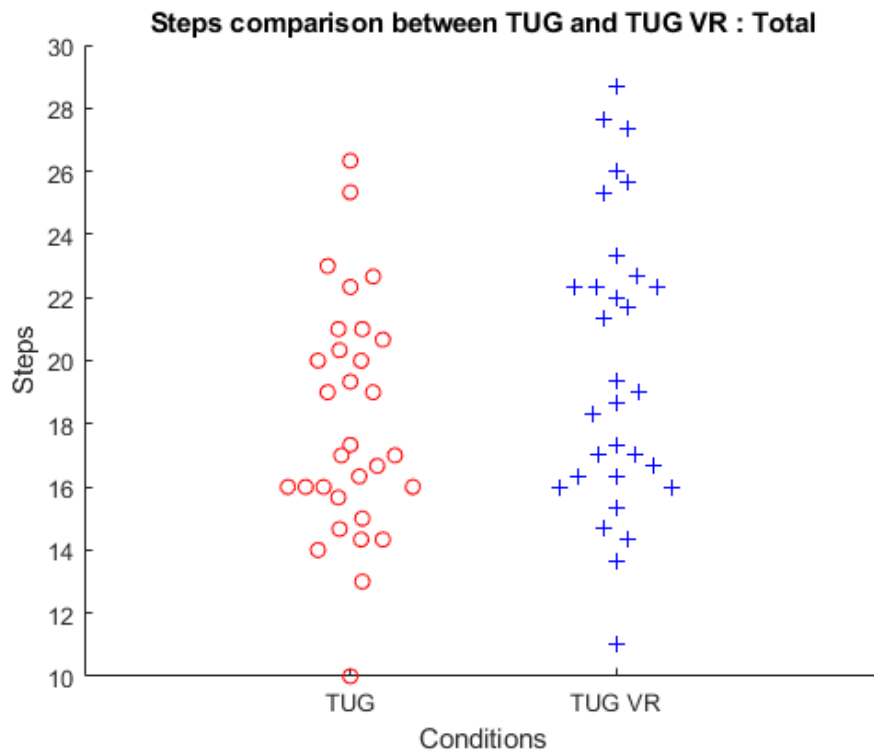


Figure 19 : Graphique en essaim d'abeilles représentant la répartition des nombres de pas totaux pour chaque condition ("Réalité virtuelle" et "Réal")

c) Présence

Les résultats au questionnaire sur le sentiment de présence, montrent, sur une échelle de -3 à +3, des scores médians (écart interquartile) de : SP = 2(1) ; INV = 0 (2.75) ; REAL = 1.5 (1.75) ; G = 2 (1.5) (Figure 20). La question générale et les trois items (SP, REAL et INV) ont été comparés au temps total et au nombre de pas total dans la condition « Réalité virtuelle ». Il n'y a pas de corrélation significative entre le temps et les différents items du questionnaire excepté pour la question générale (« Dans le monde généré par l'ordinateur, j'ai eu le sentiment "d'y être" »), positivement corrélée ($r=0.36$; $p=0.043$). Le temps augmente lorsque le sentiment de présence augmente, toutefois il n'y a pas de corrélation significative entre le nombre de pas et les items du questionnaire de présence.

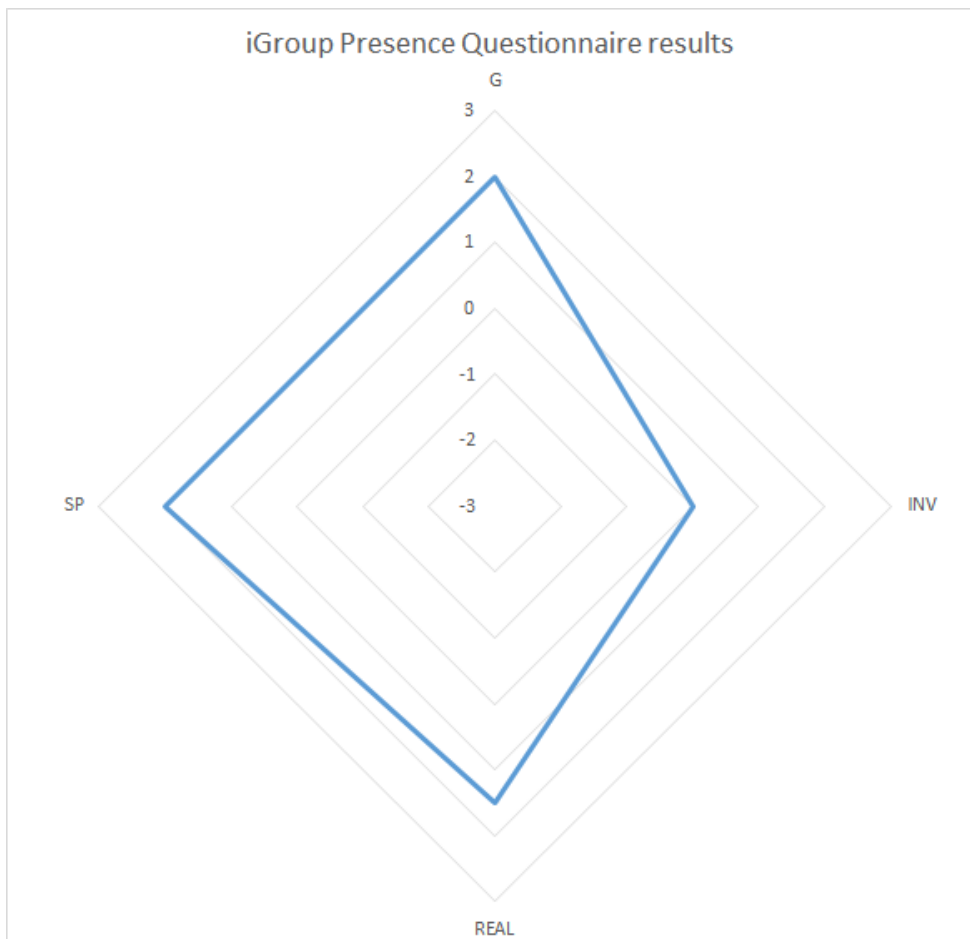


Figure 20 : Représentation graphique des résultats au questionnaire sur le sentiment de présence (IPQ).

d) « Effet Réalité Virtuelle »

Les résultats montrent des différences significatives entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle », suggérant qu'il existerait un « effet » de la réalité virtuelle qui nécessiterait

d'être quantifié. $\Delta_{\text{Time}} = \text{Time}_{\text{TUG VR}} - \text{Time}_{\text{TUG}}$ est positivement corrélé à Time_{TUG} ($p=0.0122$, $r=0.4445$). Autrement dit, si le temps mis pour effectuer le Timed Up and Go augmente, la différence de temps entre les deux conditions va s'accroître (Figure 21).

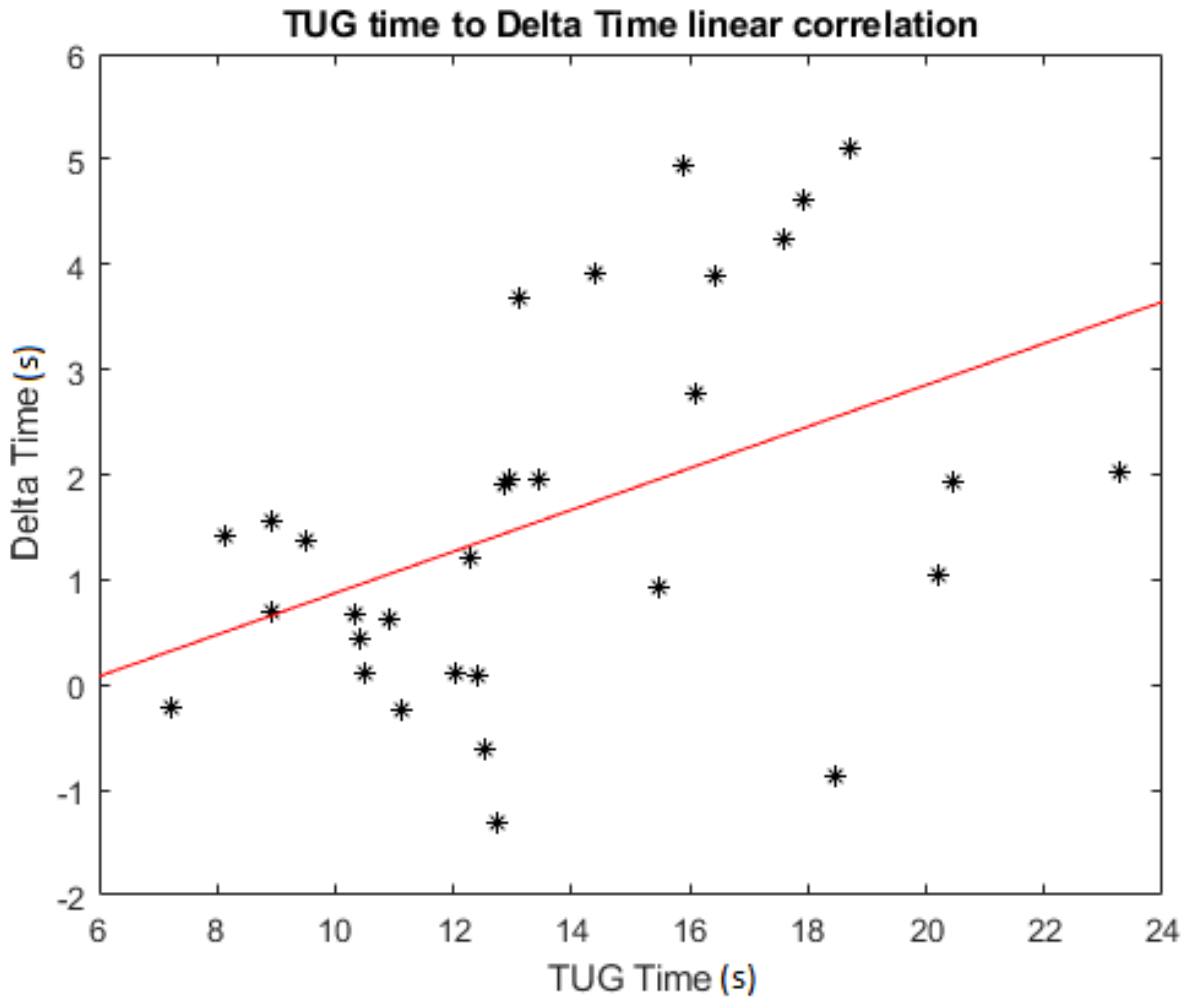


Figure 21 : Nuage de points et droite de corrélation entre le temps total au Timed Up and Go et la différence de temps entre les deux conditions (Δ_{Time})

5.2.4. Discussion

L'objectif de cette première étude était d'évaluer si le sentiment de présence généré par le fait d'utiliser un visiocasque avec un environnement virtuel pouvait impacter des paramètres spatio-temporels d'une tâche locomotrice (Timed Up and Go). Il était envisagé que la contextualisation par le virtuel augmente les paramètres de temps et de nombre de pas. Les résultats montrent effectivement une augmentation de ces paramètres ainsi qu'une corrélation avec le sentiment de présence et le temps en condition « Réel ».

Le test Timed Up and Go a été conçu comme un test binaire proposant un seuil de temps au-delà duquel une personne est considérée comme à risque de chute. Si on fait abstraction de ce seuil, on peut considérer que le temps mis par une personne pour faire la tâche est inversement proportionnel à sa capacité à s'adapter à une situation pouvant compromettre son équilibre. Les seuils proposés à l'aide des courbes ROC n'ont généralement pas une sensibilité élevée, cependant, l'augmentation du temps témoigne d'une diminution de la mobilité fonctionnelle [142]. En comparaison avec la condition « Réel » décontextualisée de la vie courante, l'idée de l'utilisation de la réalité virtuelle simulant un environnement plus représentatif pour évaluer un risque de chute est partiellement supportée par la corrélation entre la question générale du questionnaire de présence (IPQ) et les temps en « Réalité virtuelle ». Les résultats ont montré une augmentation du temps et du nombre de pas comme réponse à un environnement moins sécurisant qu'un cabinet médical ou couloir d'hôpital. Ainsi, prendre plus de temps et faire plus de pas serait une adaptation stratégique pour assurer son équilibre et éviter la chute. Il est tout de même nécessaire de contraster cette supposition avec l'effet d'une éventuelle peur de chuter (non évaluée ici) exacerbée entre autres par l'isolement visuel de l'environnement réel. Les résultats du questionnaire de présence sont difficilement exploitables en l'état étant donné le manque de corrélation des items mais aussi en l'absence de référence. Pour discuter ces résultats, nous avons choisi ici de reprendre le découpage du Timed Up and Go comme une succession d'actions motrices (phases) à difficultés variables.

a) Marche

Le vieillissement semble affecter les paramètres de la marche tels que la vitesse, résultant d'une diminution de la longueur de pas et d'une augmentation du temps de double appui [232, 233]. Chez des sujets âgés sains, une marche à vitesse et longueur de pas réduites peut être considérée comme moins déstabilisante [234]. Les variations ainsi observées dans les cycles de marche en termes de temps et de nombres de pas entre les deux conditions « Réel » et « Réalité virtuelle » viendraient d'une volonté d'assurer une stabilité suffisante. Assurer un niveau de sécurité optimal consiste à transférer l'objectif dédié à la réalisation de la tâche de manière rapide vers une réalisation sécurisante. La sécurité de la marche, étant assurée par de plus petits pas, est confirmée par l'augmentation du nombre de pas à distance équivalente comme la potentielle augmentation du temps de double appui. La largeur de pas n'a pas été mesurée lors de ces tests mais il est probable qu'elle ait augmenté comme le nombre de pas, dans une stratégie de meilleur maintien de l'équilibre, notamment chez les participants avec des membres inférieurs affectés [235].

L'environnement virtuel représentant un train a été conçu de manière à proposer une expérience virtuelle réaliste et modulable en offrant plus de conditions de réalisation du Timed Up and Go avec différentes informations visuelles (train en marche, passant dans un tunnel, passage d'un wagon à un autre) et s'adapter pour modifier les conditions de réalisation de la tâche sensori-motrice. Cet environnement peut être considéré comme une limite de l'étude par l'influence qu'il peut avoir sur les paramètres de la marche. En effet, marcher le long d'une paroi avec des fenêtres d'un côté et un passage qui se resserre (phase *aller*) ou s'élargit (phase *retour*) de l'autre aura pu influencer les paramètres de la marche. Cependant, ce type de condition ne semble affecter que des personnes présentant de la peur de chuter [207]. Notez que les phases de marche sont comprises entre deux actions plus complexes ; l'initiation de la marche démarre juste après le lever de chaise ou juste après un demi-tour et elles finissent sur l'anticipation d'un demi-tour, ou encore plus complexe : la phase *s'asseoir* [236]. Ceci signifie que sur une marche d'approximativement 3 mètres, les premiers et derniers pas (sur environ 6 pas) sont potentiellement influencés par les actions motrices juste avant et juste après [229, 230]. Nous avons également remarqué que le nombre de pas pouvait être influencé par l'anticipation des demi-tours ou plutôt la distance à laquelle les participants commencent à tourner par rapport à la ligne ou à la chaise. Ainsi, une forte anticipation du demi-tour engendre une phase de marche raccourcie. Les augmentations mesurées des nombres de pas et du temps lors des phases de marche en réalité virtuelle résultent peut-être aussi d'une moindre anticipation des demi-tours. En effet, la difficulté que peut représenter l'assise sur une chaise virtuellement modélisée chez certains participants a pu moduler l'anticipation comparé à une chaise réelle. Attention, la chaise virtuelle était bien modélisée au même emplacement que la chaise physique. L'anticipation du demi-tour est un paramètre qui mériterait d'être mieux étudié pour éventuellement devenir un observable intéressant dans les stratégies d'adaptation motrice.

b) Se lever

Il est possible que les paramètres spatio-temporels de la phase *se lever* n'aient pas été aussi influencés que les autres actions motrices en raison des indices sensoriels mis en jeu. La fin de cette phase mène à de la marche vers l'avant, ne nécessitant pas un contrôle postural bipédique important car autorisant le déséquilibre vers l'avant pour l'initiation de la marche. C'est pourquoi dans cette phase, les indices visuels ont certainement une importance moindre par rapport aux informations proprioceptives, vestibulaires et haptiques. Les participants utilisent les accoudoirs et ou leurs aides à la marche dans une tâche symétrique consistant à se lever et commencer à marcher. L'environnement virtuel diffusé dans le visiocasque n'avait pas

d'effet négatif sur le temps. De plus, étant donné l'environnement virtuel proposé, il n'est pas nécessaire de préciser que la condition « Réel » n'a pas été réalisée dans un vrai train, elle l'a été dans une pièce plus large. Ce qui implique que les indices visuels les plus proches n'étaient pas tout-à-fait à la même distance entre les deux conditions. A cause de la parallaxe, lorsque le corps oscille, les indices visuels les plus proches donnent de meilleures indications sur l'amplitude et la vitesse des oscillations que les éléments plus éloignés. Il a aussi été montré lors d'analyses posturographiques que plus le point de fixation du regard est proche, moins on oscille [237, 238]. Ainsi, il était certainement plus simple d'osciller moins dans l'environnement virtuel que dans l'environnement réel.

c) Demi-tour

La phase de demi-tour s'est vue modifiée au niveau du temps mais pas du nombre de pas, montrant une reproductibilité importante dans la stratégie motrice utilisée pour faire demi-tour. Vous aurez noté que la majorité des participants a fait plusieurs pas pour faire demi-tour, ce qui est un observable souvent utilisé pour évaluer des troubles de l'équilibre. Les quelques pas utilisés à la place d'un pivot pour la plupart des sujets, même en réel, témoignent des difficultés pour tourner de manière fluide en raison de l'instabilité et peut-être de la peur de chuter [239]. D'autres différences ont été observées entre le Timed Up and Go et le Timed Up and Go en Réalité virtuelle durant le demi-tour : certains participants ont changé leur sens de rotation. Bien que nous n'ayons pas recueilli de données sur le côté dominant pour les membres inférieurs et supérieurs des participants, il a été montré que la latéralité influence le sens de rotation à cause d'un déséquilibre dans les niveaux de dopamine entre les hémisphères. C'est pourquoi les droitiers ont tendance à tourner plutôt vers la gauche et les non-droitiers (gauchers + ambidextres) ont tendance à tourner vers leur droite [240]. Pourtant, il semblerait qu'une asymétrie fonctionnelle puisse inhiber l'effet du côté dominant dans le sens de rotation (démonstré avec des amputés trans-tibiaux) [241], asymétrie biomécanique qu'on a pu rencontrer auprès de nos participants. Les quelques participants qui ont modifié leur sens de rotation ont choisi de tourner vers la droite dans la condition « Réel » et vers la gauche en condition « Réalité virtuelle ». Ceci peut s'expliquer par l'environnement virtuel proposant la paroi du côté droit à l'aller. Dans cette configuration, tourner à droite suggère d'avoir le visage face à la paroi qui est plutôt proche et ils ont peut-être préféré conserver le regard vers l'autre côté du wagon pour prendre des informations plus pertinentes sur leur environnement proche. De plus, l'aide à la marche a une influence certaine sur le demi-tour. Par exemple, quand la

canne ou béquille est tenue du côté de la rotation, les participants avaient tendance à tourner autour.

Le fait de porter un visiocasque d'environ 500g devant les yeux peut aussi être remis en question, notamment dans le cas d'un changement de direction comme le demi-tour. Des études s'intéressant au port d'une charge déséquilibrée sur la tête ont évalué l'impact de cette masse sur les angles et moments engendrés au niveau cervical, trouvant différentes contraintes en fonction de l'orientation de la tête. La littérature a alors montré que la recherche d'indices visuels durant un demi-tour pouvait générer des rotations ou flexion « extrêmes » différentes d'une condition sans casque. Ici, ces postures « extrêmes » de la tête par rapport au tronc émanent à la fois du champ de vision restreint des visiocasques et de la masse du visiocasque créant alors un stress musculosquelettique [204, 205, 206, 208]. Toutefois, ces effets semblent limités dans cette étude par la faible amplitude de mouvement de la tête durant le demi-tour. Ces effets de masse devraient être pris en compte à l'occasion de nouvelles études pour parvenir à contrecarrer le moment de force cervical avec une masse plus équilibrée ou un nouveau système de fixation du casque. Le champ de vision des participants pourrait aussi faire l'objet d'une évaluation pour

- pondérer la restriction de ce champ de vision induite par le visiocasque.
- Combiner la cinématique de la tête avec un eye-tracking pourrait permettre l'analyse des mouvements de la tête pour compenser la réduction du champ de vision dans des situations d'exploration visuelle.

Tester les dernières solutions de fixation proposées par les fabricants avec un même environnement permettrait aussi d'attester des améliorations de confort et d'ergonomie.

d) S'asseoir

La dernière et plus complexe des phases était accomplie de deux manières différentes :

- La première, plus rapide, consistait à amorcer la descente et la rotation simultanément,
- la seconde, plus lente, consistait à dissocier le demi-tour et l'assise. A l'observation des participants durant cette phase, il y avait les personnes suffisamment en confiance pour s'asseoir directement et les personnes qui avaient besoin de toucher la chaise, cherchant le dossier ou les accoudoirs de la main ou alors touchant l'assise avec l'arrière des genoux avant de s'asseoir.

D'après les temps au Timed Up and Go, plus on a besoin de temps pour faire le test, plus on est à risque de chute. Dans le cas présent, la comparaison peut être faite entre les deux stratégies employées pour s'asseoir où la plus rapide donne la plus grande efficacité de mouvement (ratio optimal entre la réalisation du mouvement et l'énergie consommée) tandis que la plus lente a un objectif différent qui est le maintien de l'équilibre en simplifiant l'exécution au détriment de l'efficacité. Par exemple, la marche requiert de l'attention et le niveau d'attention semble corrélé à la vitesse de marche [242], supportant l'hypothèse du besoin de dissocier le demi-tour de l'assise. De plus, l'anxiété liée à la chute montre une demande attentionnelle plus importante lorsque l'équilibre est menacé, entraînant une augmentation du temps de double appui et une réduction du temps de simple appui mais avec un pattern de marche conservé [243]. Si on transpose ces résultats à la phase *s'asseoir*, le niveau d'anxiété, lié à l'immersion en réalité virtuelle où les participants ne pouvaient pas voir ni leur propre corps ni la chaise réelle, a contribué à accroître le temps de réalisation de cette phase, ainsi que les autres (*aller, demi-tour et retour*).

e) Présence

Malgré sa faible corrélation avec les résultats spatio-temporels, le questionnaire sur le sentiment de présence procure un état de l'expérience virtuelle au moment de l'étude. Ses résultats dépendent également de l'expérience des utilisateurs en matière de réalité virtuelle immersive. Chaque participant à cette étude avait déjà entendu parler de réalité virtuelle mais aucun n'avait eu l'opportunité d'essayer avant. Après avoir recueilli les impressions des participants, il semble que l'expérience en réalité virtuelle ait provoqué ce qu'on peut appeler un effet « wouahou » ou effet de surprise. Cette observation montre qu'il peut y avoir un décalage plus ou moins prononcé entre les technologies existantes et ce qu'ont pu expérimenter les participants, plus particulièrement pour les populations détachées des nouvelles technologies.

f) Effet « Réalité virtuelle »

L'effet « Réalité virtuelle », déterminé par la différence de temps entre la condition « Réel » et la condition « Réalité virtuelle », est positivement corrélée au temps mis pour effectuer la tâche sans réalité virtuelle, donc la quantification de l'effet « Réalité virtuelle » s'est basée sur l'information que fournit le test Timed Up and Go. Au-delà du seuil de temps déterminé par les sensibilité et spécificité optimales, le temps révèle la capacité du participant à s'adapter et se mouvoir dans son environnement. Parce qu'il est demandé d'effectuer le test

sans se mettre en danger, plus il met de temps, plus il lui sera difficile de s'adapter à son environnement. Cette corrélation suggère alors que plus un participant est à l'aise dans l'environnement réel, moins il aura de difficultés à s'adapter à l'environnement virtuel.

Nous n'avons pas évalué l'impact du genre sur le contrôle locomoteur en réalité virtuelle. Ceci pourrait faire l'objet de prochaines études car les effets du vieillissement peuvent se différencier selon le genre comme l'ostéoporose ou encore la peur de chuter. Dans cette étude nous avons choisi la réalité virtuelle comme le moyen de simuler la réalité et non pas un monde imaginaire.

Nous voulions ainsi proposer une expérience à nos participants qui puisse être enrichie tout en restant cohérente. Nous allons donc être en mesure d'évaluer les personnes dans un train virtuel roulant, prétexte à l'ajout d'un flux optique linéaire au Timed Up and Go. Dans cette étude, le matériel de réalité virtuelle n'est pas dissocié de l'environnement virtuel et, en l'état, nous sommes incapables de pondérer l'effet de l'un ou de l'autre sur la motricité des participants. Il pourrait donc être intéressant de tester notamment deux environnements réel et virtuel similaires pour connaître l'effet principalement associé à la technique.

5.3. Etude #2 : Does the management of visual and audible motion information during an immersive virtual reality Timed Up & Go test impact locomotor performance in the elderly?

5.3.1. Objectifs et hypothèses

L'étude #1 a proposé l'évaluation du comportement locomoteur chez des personnes âgées portant un dispositif de réalité virtuelle immersive. La scène numérisée n'offrait alors qu'une situation limitée de la vie courante. Or, il est important de pouvoir évaluer ce comportement locomoteur au sein d'une expérience virtuelle plus stimulante, c'est pourquoi nous avons mis ce train virtuel en mouvement linéaire uniforme, ce qui s'est traduit par un défilement (visuel) régulier du paysage par les fenêtres ainsi qu'un fond sonore évoquant le mouvement du train sur les rails. L'objectif de cette deuxième étude était d'évaluer le comportement moteur sur la même tâche locomotrice en réel et en réalité virtuelle immersive lorsque l'environnement virtuel est stable et qu'il donne une information visuelle et sonore du mouvement. Une hypothèse était qu'il y aurait une variation des paramètres spatio-temporels du Timed Up and Go entre les conditions en réel et en réalité virtuelle, mais un impact modéré de l'information de mouvement entre les deux conditions en réalité virtuelle.

5.3.2. Méthodologie spécifique

Soixante-deux personnes âgées (47F-15H, 70.8 ± 6.7 ans) ont participé à cette étude. Deux participants n'ont pu réaliser l'intégralité des tests et ont été retirés du traitement statistique des résultats.

Pour cette deuxième étude, il faut comparer les trois conditions « Réel », « Réalité virtuelle », « Réalité virtuelle en mouvement », à la fois pour les temps et pour les nombres de pas. Les tests de normalité et de sphéricité suggèrent l'utilisation d'un test de comparaison non paramétrique pour échantillons appariés. Les trois essais ont d'abord été moyennés puis les distributions ont été comparées à l'aide d'un test de Friedman et un post-hoc Nemenyi avec un seuil de signification α de 5%. Les résultats sont présentés sous la forme des médianes et écarts interquartiles.

5.3.3. Résultats

Tableau 5 : Médianes (écart interquartile) des temps et nombres de pas dans les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement") pour chaque phase et le total.

TUG Phase	Time (s)	Time VR (s)	Time VRm	Steps	Steps VR	Steps VRm
Get Up (GU)	1,21 (0,35)	1,34 (0,46)	1,36 (0,44)			
Go	2,91 (0,88)	3,07 (1,00)	3,19 (1,19)	5,00 (1,67)	5,33 (1,33)	5,33 (1,33)
Turn Around (TA)	1,82 (0,57)	2,17 (0,85)	2,25 (0,90)	3,33 (1,00)	3,67 (1,67)	4,00 (1,50)
Return (Re)	2,89 (1,04)	2,95 (0,94)	2,98 (0,91)	4,83 (1,50)	5,00 (1,17)	5,17 (1,33)
Sit-Down (SD)	2,93 (0,90)	3,37 (1,01)	3,49 (1,18)	3,67 (1,00)	4,00 (1,33)	4,00 (1,67)
Total	11,82 (2,80)	12,77 (4,13)	13,03 (4,40)	16,67 (3,67)	18,50 (4,50)	18,83 (5,17)

Les résultats obtenus montrent une augmentation des temps et nombres de pas médians en « Réalité virtuelle » comparé à « Réel » et en « Réalité virtuelle en mouvement » comparé à « Réel » et à « Réalité virtuelle ». Excepté pour le nombre de pas nécessaires pour réaliser les phases *Aller* et *S'asseoir* entre les deux conditions en réalité virtuelle. (Tableau 5)

a) Temps

- Entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle », on observe une augmentation significative du temps total ($p < 0.001$) et du temps pour les phases du Timed Up and Go (GU : $p < 0.05$; Go : $p < 0.001$; TA : $p < 0.01$; SD : $p < 0.001$) excepté pour la phase de *Retour* ($p = 0.31$).
- Entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle en mouvement », le temps a augmenté significativement pour le test complet ($p < 0.001$) et chaque phase (GU : $p < 0.01$; Go : $p < 0.001$; TA : $p < 0.001$; Re : $p < 0.01$; SD : $p < 0.001$).
- Entre les conditions « Réalité virtuelle » et « Réalité virtuelle en mouvement », le temps a augmenté mais pas de manière significative, ni pour le Timed Up and Go complet, ni pour ses phases consécutives (Total : $p = 0.16$; GU : $p = 0.84$; Go : $p = 0.84$; TA : $p = 0.13$; Re : $p = 0.11$; SD : $p = 0.98$).

(Figure 22 - Figure 23)

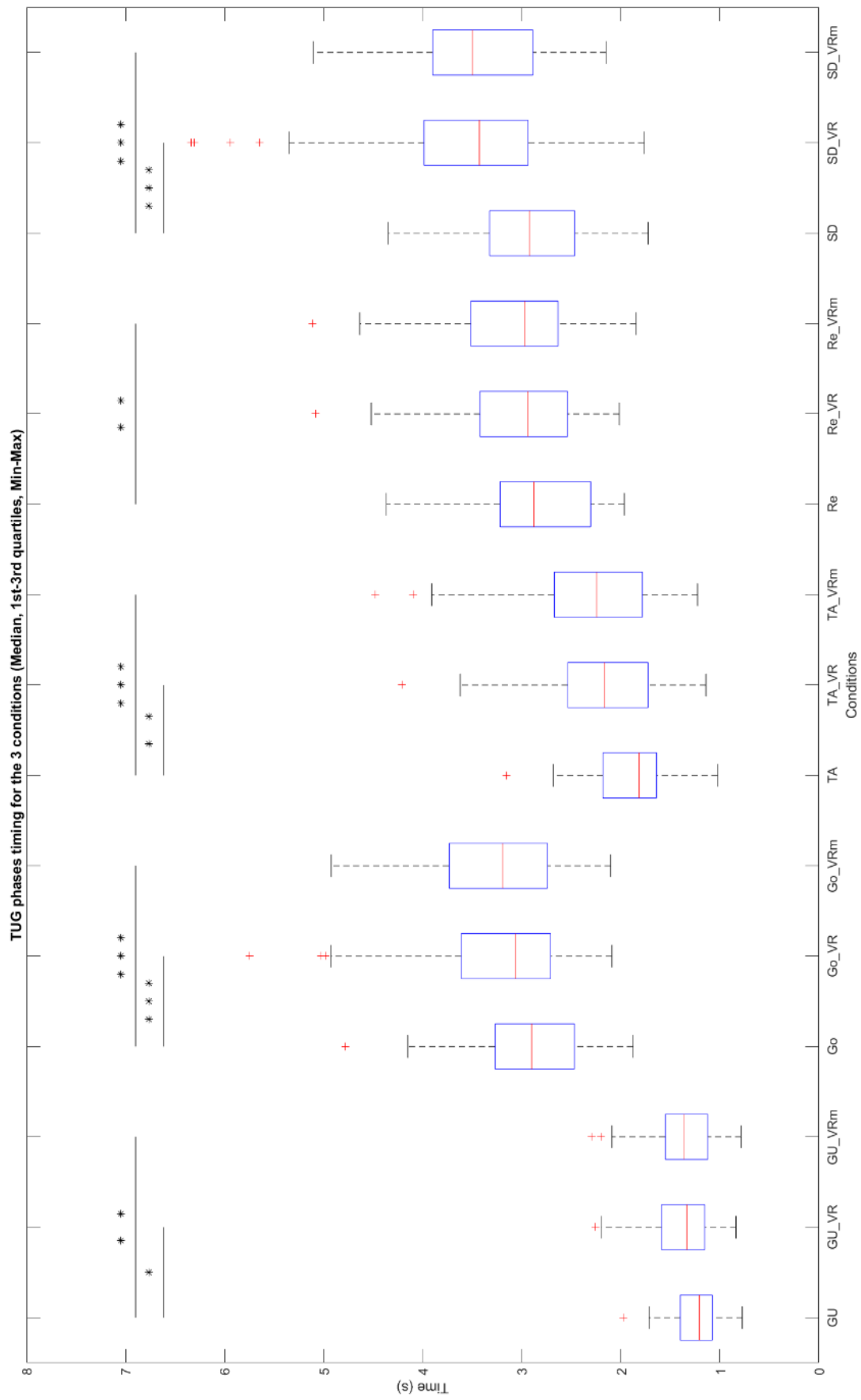


Figure 22 : Comparaison des temps médians pour chaque phase du Timed Up and Go entre les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement") * $p < 0.050$; ** $p < 0.010$; *** $p < 0.001$.

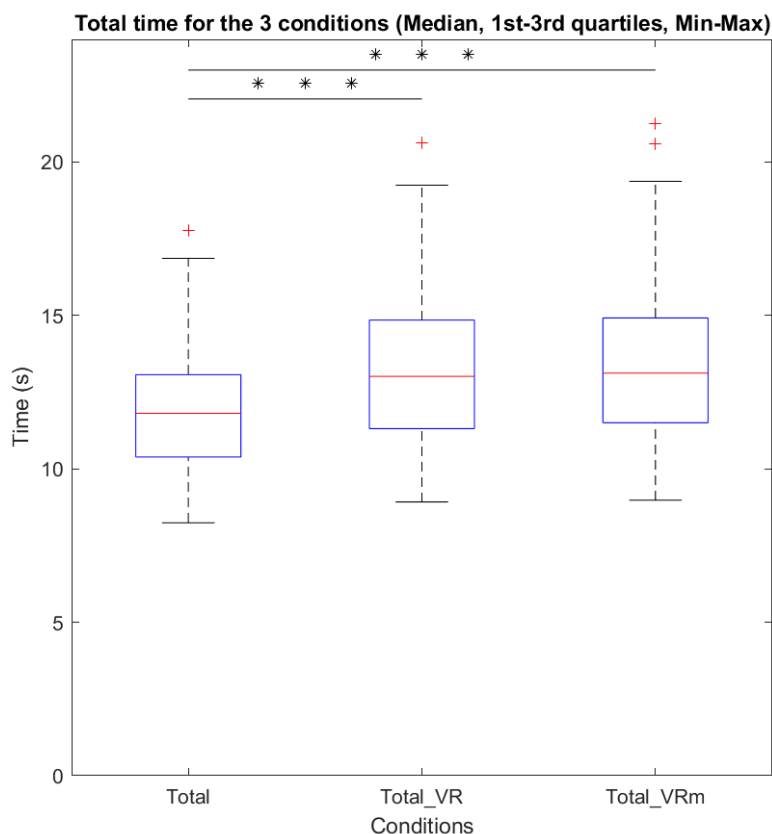


Figure 23 : Comparaison des temps totaux médians pour compléter le Timed Up and Go dans les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement") *** $p < 0.001$.

b) Nombre de pas

- Entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle », le nombre de pas a augmenté pour le test entier (Total : $p < 0.001$) et pour chaque phase du Timed Up and Go (Go : $p < 0.001$; Re : $p < 0.01$; SD : $p < 0.001$) et montre une tendance pour la phase de *demi-tour* (TA : $p = 0.053$).
- Entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle en mouvement », le nombre de pas augmente significativement, cette fois pour le test complet et pour toutes les phases du Timed Up and Go (Total : $p < 0.001$; Go : $p < 0.001$; TA : $p < 0.001$; Re : $p < 0.001$; SD : $p < 0.001$).
- Entre les conditions « Réalité virtuelle » et « Réalité virtuelle en mouvement », le nombre de pas a pu augmenter mais pas de manière significative, ni pour le Timed Up and Go complet (tendance), ni pour ses phases consécutives (Total : $p = 0.063$; Go : $p = 0.400$; TA : $p = 0.110$; Re : $p = 0.216$; SD : $p = 0.610$).

(Figure 24 - Figure 25)

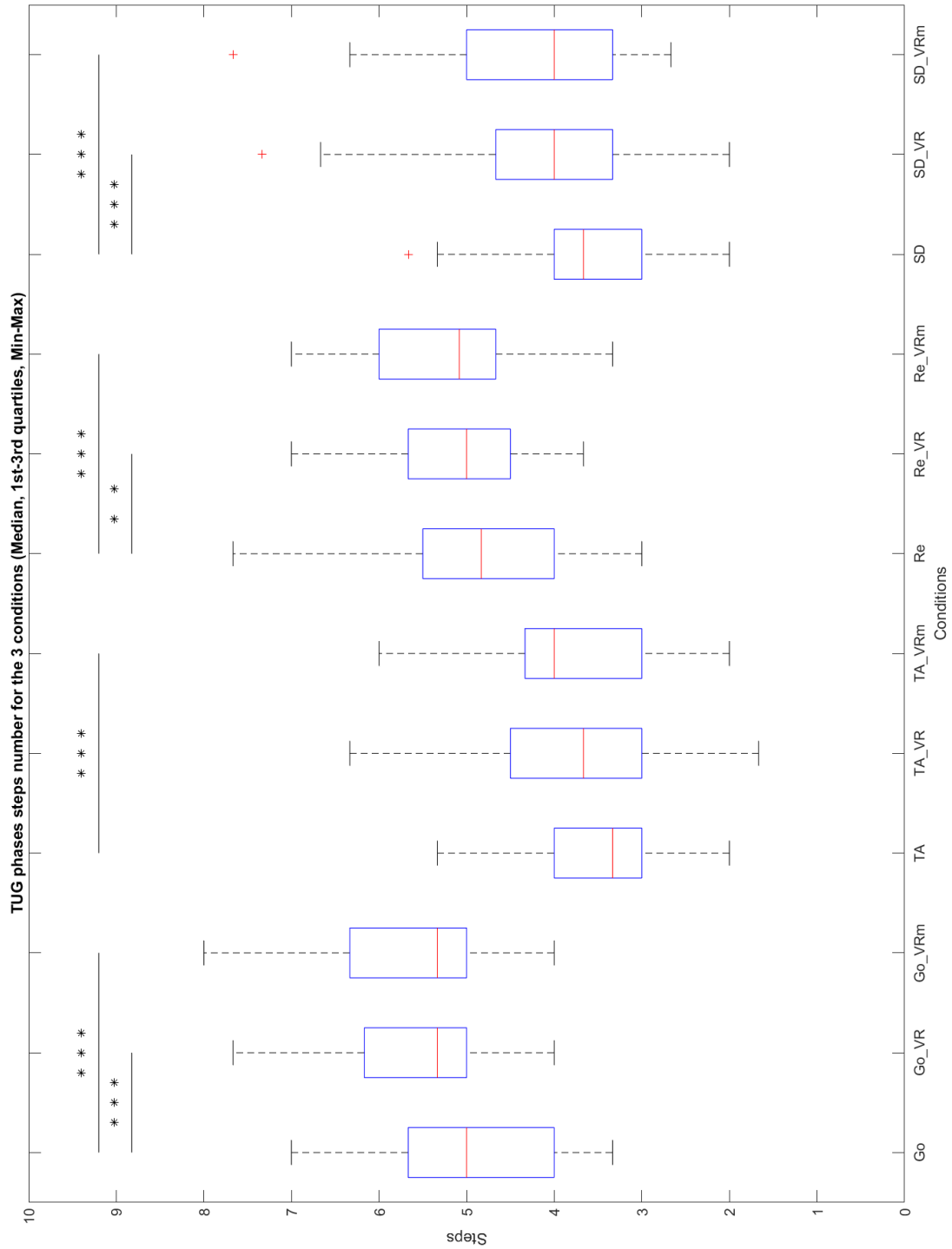


Figure 24 : Comparaison des nombres de pas médians pour chaque phase du Timed Up and Go entre les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement") ** $p < 0.010$; *** $p < 0.001$.

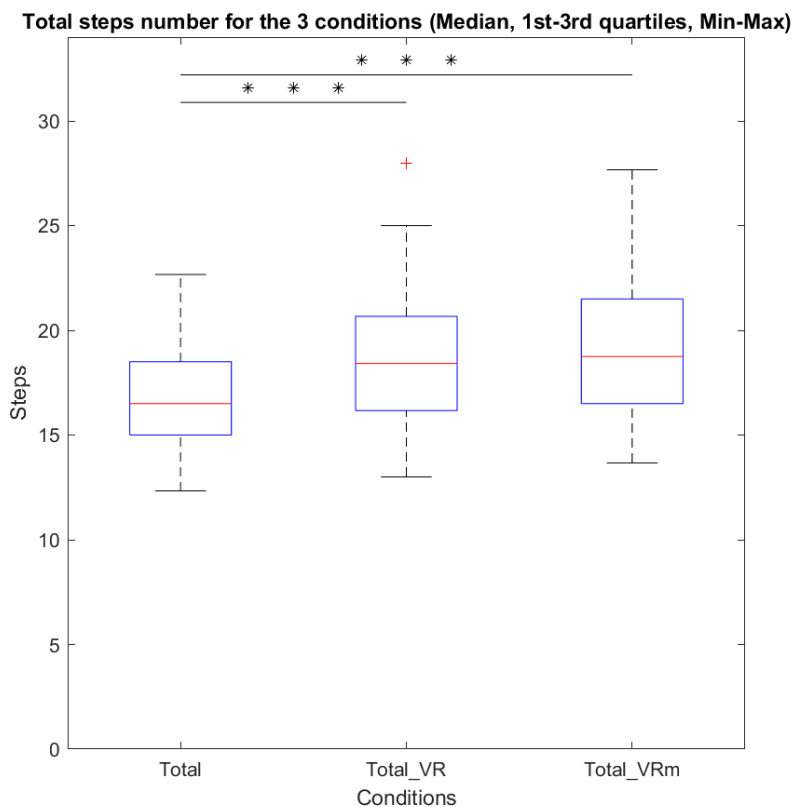


Figure 25 : Comparaison des nombres de pas totaux médians pour compléter le Timed Up and Go dans les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement") *** $p < 0.001$.

5.3.4. Discussion

L'objectif de cette deuxième étude était d'évaluer si le fait d'utiliser un visiocasque avec un environnement virtuel peut impacter des paramètres spatio-temporels d'une tâche locomotrice (Timed Up and Go), dans le cas où l'environnement virtuel est stable et pour le cas où il simule (image et son) un mouvement linéaire uniforme. Il était envisagé que la contextualisation par le virtuel augmente les paramètres de temps et de nombre de pas mais que le mouvement n'aie pas ou peu d'impact sur le comportement moteur.

On a pu voir que l'utilisation d'un visiocasque pour une expérience virtuelle immersive avait un impact sur le contrôle locomoteur dans une tâche telle qu'un Timed Up and Go (Etude #1, [227]). Pourtant, il semblerait que le fait d'ajouter des informations visuelles et sonores de mouvement, aussi réalistes et courantes puissent-elles être, n'affecte pas vraiment les paramètres spatio-temporels. Parmi tous les facteurs explicatifs, certains peuvent être considérés comme dominants. Le premier qui peut expliquer l'effet minimisé du mouvement simulé est ce qui distingue notre condition « Réalité virtuelle en mouvement » des applications utilisées dans le champ de la kinésithérapie vestibulaire (flux optique linéaire, optocinétique,

verticale visuelle subjective...). Dans le train en marche, les participants étaient entourés par la structure du wagon qui occulte une grande partie du paysage, visible seulement à travers les fenêtres. Cela veut dire que le flux optique linéaire tel qu'on le crée dans les films de science-fiction lorsqu'un vaisseau spatial atteint une haute vitesse faisant se déplacer les étoiles vers l'arrière ou encore le déplacement dans un tuyau, ne représente dans ce cas précis qu'une petite partie du champ visuel de l'utilisateur. Ici, l'intérieur du wagon bar offre un support visuel fixe. Ce support fixe offre le même bénéfice que lorsqu'on regarde un flux optique linéaire sur un simple écran de télévision et joue le rôle d'une véritable béquille visuelle. La vision périphérique donne habituellement les informations visuelles de mouvement or, pour le cas d'un écran où l'extérieur est fixe, la vision périphérique confirme les informations vestibulaires d'immobilité [184]. De plus, les mouvements avec la parallaxe donnent des informations plus précises sur les oscillations du corps en fixant du regard un objet proche [244]. L'environnement virtuel proche donne donc de meilleures informations visuelles que le paysage. Ainsi, la stratégie de focaliser sur l'environnement proche permettrait de se déplacer de manière plus sécurisante.

De plus, il peut y avoir des différences entre les personnes pour ce qui concerne les préférences sensorielles et l'utilisation des informations visuelles, vestibulaires et proprioceptives dans des proportions variables. Pour ce paradigme expérimental, les informations de mouvement sont seulement visuelles et sonores, ce protocole ne stimule spécifiquement pas particulièrement les entrées vestibulaires et proprioceptives. Les personnes privilégiant les informations vestibulaires seront peut-être moins influencées que celles privilégiant la vision. Il est même possible que le son, non spatialisé mais toutefois cohérent, ait pu améliorer le contrôle postural [245].

Un autre facteur explicatif de la faible différence entre le train à l'arrêt et en marche est la tâche qui a été proposée : le Timed Up and Go. Puisqu'elle est chronométrée, l'objectif pour les participants est d'aller le plus vite possible (sans se mettre en danger). C'est pourquoi, se concentrer à la fois sur l'objectif de vitesse et sur la valise en face implique qu'ils portent peu ou pas d'attention au paysage qui défile par les fenêtres. L'absence de mouvements latéraux ou de vibrations réduit à l'évidence l'immersion et l'impression d'être effectivement dans un train en marche, l'attention est donc essentiellement focalisée sur la tâche et non le mouvement simulé. Les essais ont été réalisés dans le même sens pour chaque participant, ils étaient assis dans la direction de la trajectoire du train, impliquant que la phase de retour était dans le sens opposé. Il pourrait être intéressant de changer le sens de déplacement du train pour voir si cela a un effet sur la motricité des participants.

Des études montrent qu'un déséquilibre en dopamine entre les deux hémisphères donne un sens de rotation naturel lié à la latéralité [240]. Les droitiers tournent plutôt à gauche et les non droitiers (gauchers et ambidextres) tournent plutôt à droite. En association avec le fait que 90% de la population est droitière [246, 247, 248], nos participants avaient tendance à tourner plutôt sur leur gauche. Naturellement, ils faisaient face au bar et non la fenêtre lors de la phase *demi-tour*, mais ils faisaient face aux fenêtres pour la phase *s'asseoir*. Cela veut dire que, comme la plupart des participants tournaient à gauche, ces derniers faisaient face aux fenêtres de manière rapprochée durant leur demi-tour dans la phase *s'asseoir*. A ce moment, le panorama défilant prenait une part plus importante du champ de vision réduisant ainsi les béquilles visuelles. Il est possible que le mouvement visuellement simulé ait eu plus d'impact dans cette configuration particulière et ponctuelle. Il serait intéressant de tester le même environnement en symétrique pour évaluer l'impact propre du mouvement lors de la phase *s'asseoir* particulièrement, où l'on fait face ou non à la vitre au moment de la rotation.

Bien que nous n'ayons pas relevé de différences significatives entre le train à l'arrêt et le train en marche sur les paramètres spatio-temporels, il est à noter que deux participants ont été exclus des résultats car ils n'ont pas pu réaliser les essais en condition « Réalité virtuelle en mouvement ». Sans être capables d'expliquer clairement pourquoi ils n'ont pu aller au bout, ils ne se sont pas sentis « en sécurité » au moment de lâcher l'accoudoir. Nous estimons qu'il s'agissait de difficultés liées à la peur de chuter et au fait de ne pas pouvoir voir l'environnement réel. La peur de chuter devrait faire l'objet de prochaines études pour évaluer son impact sur le comportement moteur [249, 250, 251]. En effet, dans l'environnement virtuel, le niveau d'anxiété vis-à-vis de la chute est susceptible d'augmenter en raison des faux/virtuels indices visuels qu'il donne pour le cas où les participants auraient besoin de se rattraper sans voir l'environnement réel. Ainsi, une faible confiance en son équilibre ou des difficultés à éviter la chute, qui plus est en étant immergé et isolé dans un environnement virtuel, a rendu la tâche impossible pour ces deux participants.

5.4. Etude #3 : Is young adults motor control as affected as for elders using immersive virtual reality?

5.4.1. Objectifs et hypotheses

Dans les études #1 et #2, nous avons voulu comprendre l'influence de la réalité virtuelle immersive sur le comportement locomoteur de personnes âgées. Nous avons évalué le sentiment de présence (Etude #1) et nous avons également observé des différences significatives sur les paramètres spatio-temporels de la locomotion par rapport à la condition « Réel ». Nous avons réitéré la démarche avec une scène simulant un mouvement linéaire régulier en conservant l'intention de proposer une scène de la vie courante et n'avons cette fois pas observé de différences entre la scène virtuelle immobile et la scène virtuelle mobile. À la suite de ces expérimentations, une question s'est posée : est-ce que ces résultats reflètent un comportement qui serait plutôt dû à l'âge, au genre et/ou à la réalité virtuelle ?

Dans cette étude, nous avons souhaité vérifier si :

- Est-ce que « l'effet réalité virtuelle » observé dans l'étude #1 est dépendant de l'âge et du genre des participants ? Le fait de porter un visiocasque et d'être immergé dans un environnement virtuel pourrait-il impacter le comportement moteur de quiconque non entraîné, quel que soit l'âge ou le genre ?
- Nous n'avons pas observé de différences entre le train à l'arrêt et le train en marche chez nos personnes âgées dans l'étude #2, il n'est toutefois pas exclu que la tâche réalisée en mouvement simulé du train impacte moins les jeunes adultes que les personnes âgées qui ont besoin de sécuriser davantage leurs déplacements.

5.4.2. Méthodologie spécifique

Quarante-cinq jeunes adultes (30F-15H, 21.75 ± 1.35 ans) et 45 personnes âgées (30F-15H, 69.96 ± 6.88 ans) ont participé à l'étude.

Les données ont été comparées en intra chez les jeunes adultes et les personnes âgées en reprenant la méthode statistique utilisée pour l'étude #2. Pour comparer les deux populations, les résultats (temps et nombre de pas) d'une condition ont été normalisés en fonction d'une autre :

- « Réalité virtuelle » est exprimée en pourcentage de « Réel »
- « Réalité virtuelle en mouvement » est exprimée en pourcentage de « Réel »
- « Réalité virtuelle en mouvement » est exprimée en pourcentage de « Réalité virtuelle »

Ces valeurs normalisées ont été comparées deux à deux entre les jeunes adultes et les personnes âgées à l'aide du test non paramétrique pour échantillons indépendants U de Mann Whitney. L'impact du genre et de l'âge (+ interaction) a été déterminé à l'aide d'une ANOVA multifactorielle. Le seuil de signification α est fixé à 5%.

5.4.3. Résultats

Tableau 6 : **Jeunes Adultes**, médianes (écart interquartile) des temps et nombres de pas dans les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuel en mouvement") pour chaque phase et le total.

TUG Phase	Gender	Time (s)	Time VR (s)	Time VRp (s)	Steps	Steps VR	Steps VRp
Get Up (GU)	Men	0,59 (0,13)	0,61 (0,14)	0,64 (0,15)			
	Women	0,57 (0,13)	0,61 (0,14)	0,63 (0,11)			
	Total	0,58 (0,12)	0,61 (0,14)	0,63 (0,13)			
Go	Men	1,57 (0,38)	1,68 (0,34)	1,62 (0,29)	3,00 (0,00)	3,33 (0,92)	3,00 (0,58)
	Women	1,55 (0,22)	1,75 (0,35)	1,82 (0,32)	3,00 (0,58)	4,00 (0,92)	4,00 (0,67)
	Total	1,55 (0,34)	1,72 (0,35)	1,77 (0,35)	3,00 (0,42)	4,00 (1,00)	4,00 (1,00)
Turn Around (TA)	Men	0,81 (0,16)	1,15 (0,37)	1,16 (0,36)	2,00 (0,00)	2,33 (1,00)	2,00 (1,00)
	Women	0,94 (0,19)	1,08 (0,34)	1,10 (0,28)	2,00 (0,33)	2,33 (0,92)	2,00 (0,92)
	Total	0,92 (0,27)	1,08 (0,32)	1,10 (0,30)	2,00 (0,08)	2,33 (1,00)	2,00 (1,00)
Return (Re)	Men	1,35 (0,40)	1,32 (0,17)	1,38 (0,23)	3,00 (0,58)	3,00 (0,00)	3,00 (0,00)
	Women	1,32 (0,39)	1,40 (0,31)	1,41 (0,34)	3,00 (0,58)	3,00 (0,33)	3,00 (0,33)
	Total	1,33 (0,39)	1,40 (0,29)	1,41 (0,34)	3,00 (0,67)	3,00 (0,00)	3,00 (0,33)
Sit Down (SD)	Men	1,51 (0,39)	1,73 (0,50)	1,80 (0,38)	2,00 (0,33)	2,00 (1,00)	2,33 (0,67)
	Women	1,53 (0,34)	1,66 (0,43)	1,72 (0,34)	2,00 (0,67)	2,00 (0,67)	2,33 (0,58)
	Total	1,53 (0,35)	1,69 (0,44)	1,75 (0,34)	2,00 (0,42)	2,00 (0,67)	2,33 (0,67)
Total	Men	5,90 (0,69)	6,56 (0,70)	6,49 (0,73)	10,00 (0,33)	11,00 (0,33)	11,00 (0,33)
	Women	5,81 (0,61)	6,49 (0,73)	6,53 (0,72)	10,00 (1,33)	11,00 (1,58)	11,67 (1,33)
	Total	5,83 (0,71)	6,52 (0,75)	6,53 (0,82)	10,00 (1,33)	11,00 (1,08)	11,33 (1,33)

Tableau 7: **Personnes Agées**, médianes (écart interquartile) des temps et nombres de pas dans les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuel en mouvement") pour chaque phase et le total.

TUG Phase	Gender	Time (s)	Time VR (s)	Time VRp (s)	Steps	Steps VR	Steps VRp
Get Up (GU)	Men	1,29 (0,34)	1,19 (0,06)	1,26 (0,25)			
	Women	1,21 (0,36)	1,51 (0,40)	1,41 (0,42)			
	Total	1,21 (0,36)	1,37 (0,48)	1,36 (0,44)			
Go	Men	2,91 (0,87)	3,08 (0,69)	3,07 (0,73)	5,00 (0,92)	5,00 (0,92)	5,00 (0,92)
	Women	2,94 (0,93)	3,27 (1,16)	3,25 (1,25)	5,00 (1,92)	5,67 (1,58)	6,00 (1,67)
	Total	2,91 (0,95)	3,16 (1,02)	3,19 (1,19)	5,00 (2,00)	5,33 (1,33)	5,33 (1,42)
Turn Around (TA)	Men	1,96 (0,52)	2,18 (1,06)	2,23 (1,09)	3,67 (1,33)	3,67 (1,92)	4,00 (1,92)
	Women	1,81 (0,72)	2,23 (0,95)	2,26 (0,99)	3,33 (0,92)	3,67 (1,67)	4,00 (1,25)
	Total	1,85 (0,60)	2,20 (0,99)	2,26 (0,90)	3,33 (1,00)	3,67 (1,67)	4,00 (1,67)
Return (Re)	Men	2,98 (1,02)	2,97 (0,78)	2,88 (0,79)	4,67 (0,58)	5,00 (0,92)	5,00 (0,50)
	Women	2,99 (1,04)	3,01 (1,17)	3,15 (0,89)	5,00 (1,25)	5,33 (1,33)	5,33 (1,00)
	Total	2,98 (1,09)	3,00 (0,90)	2,96 (0,86)	5,00 (1,67)	5,00 (1,08)	5,00 (1,33)
Sit Down (SD)	Men	3,22 (1,25)	3,56 (1,01)	3,63 (1,02)	3,67 (1,25)	4,67 (1,50)	4,67 (1,58)
	Women	2,86 (1,05)	3,36 (1,04)	3,50 (1,35)	3,67 (0,92)	4,00 (1,58)	4,00 (1,58)
	Total	2,92 (0,96)	3,47 (1,01)	3,50 (1,35)	3,67 (0,75)	4,00 (1,67)	4,00 (1,67)
Total	Men	12,48 (2,92)	13,34 (3,21)	14,13 (2,92)	16,33 (3,33)	19,00 (3,58)	18,67 (4,83)
	Women	11,45 (2,98)	13,66 (5,13)	13,35 (4,09)	17,00 (3,67)	19,00 (3,83)	19,33 (5,50)
	Total	11,93 (2,92)	13,65 (3,86)	13,36 (4,27)	17,00 (3,67)	19,00 (4,67)	19,00 (5,42)

a) Temps pour les Jeunes Adultes

Les résultats montrent une augmentation du temps dans les deux conditions en réalité virtuelle par rapport à la condition « Réel » et une augmentation du temps en condition « Réalité virtuelle en mouvement » par rapport à la condition « Réalité virtuelle » excepté pour la phase de *retour* qui diminue (Tableau 6).

- Entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle », on observe une augmentation significative du temps total ($p < 0.001$) et du temps pour les phases du Timed Up and Go (Go : $p < 0.001$; TA : $p < 0.001$; SD : $p < 0.01$) excepté les phases *se lever* et *retour* (GU : $p = 0.139$; Re : $p = 0.415$).
- Entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle en mouvement », le temps a augmenté significativement pour le test complet ($p < 0.001$) et chaque phase (GU : $p < 0.05$; Go : $p < 0.001$; TA : $p < 0.001$; SD : $p < 0.001$) à l'exception de la phase *retour* qui présente une tendance (Re : $p = 0.068$).
- Entre les conditions « Réalité virtuelle » et « Réalité virtuelle en mouvement », le temps a augmenté mais pas de manière significative, ni pour le Timed Up and Go complet, ni pour ses phases consécutives (Total : $p = 0.477$; GU : $p = 0.802$; Go : $p = 0.962$; TA : $p = 1.000$; Re : $p = 0.609$; SD : $p = 0.415$).

(Figure 26 & Figure 27)

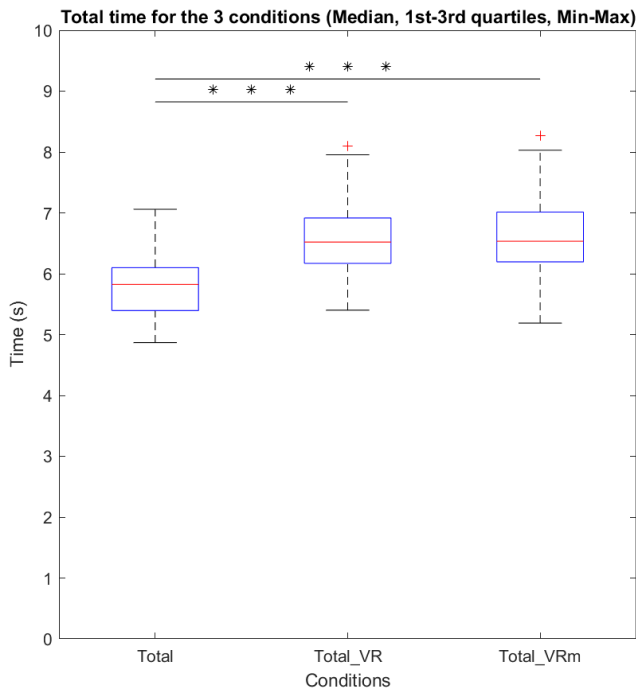


Figure 26 : Comparaison des temps totaux médians pour compléter le Timed Up and Go dans les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement") chez les Jeunes Adultes. *** $p < 0.001$.

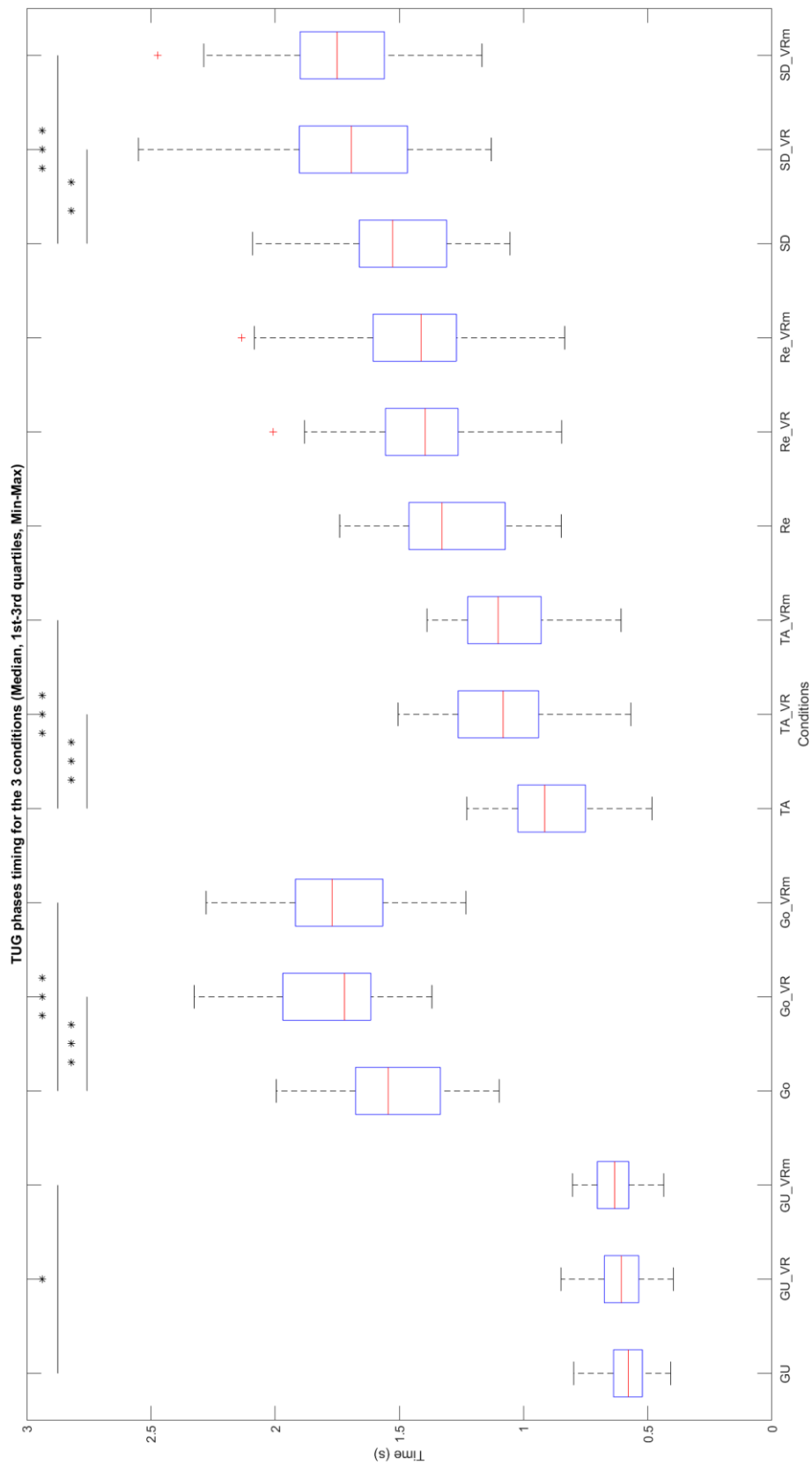


Figure 27 : Comparaison des temps médians pour chaque phase du Timed Up and Go entre les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement"), chez les Jeunes Adultes. * $p < 0.050$; ** $p < 0.010$; *** $p < 0.001$.

b) Nombre de pas pour les Jeunes Adultes

Les résultats montrent des augmentations ou égalités concernant le nombre de pas dans les deux conditions en réalité virtuelle par rapport à la condition « Réel » et des augmentations, diminutions et égalités des nombres de pas en condition « Réalité virtuelle en mouvement » par rapport à la condition « Réalité virtuelle », (Tableau 6).

- Entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle », le nombre de pas est significativement différent pour le test entier (Total : $p < 0.001$) et pour des phases *aller* et *demi-tour* du Timed Up and Go (Go : $p < 0.001$; TA : $p < 0.01$) et une tendance pour la phase *retour* mais une différence non significative pour *s'asseoir* (Re : $p = 0.099$; SD : $p = 0.639$).
- Entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle en mouvement », le nombre de pas est significativement différent pour le test complet et pour les phases du Timed Up and Go (Total : $p < 0.001$; Go : $p < 0.001$; TA : $p < 0.05$; Re : $p < 0.001$) à l'exception de la phase *s'asseoir* (SD : $p = 0.595$).
- Entre les conditions « Réalité virtuelle » et « Réalité virtuelle en mouvement », le nombre de pas a pu être modifié mais pas de manière significative, ni pour le Timed Up and Go complet, ni pour ses phases consécutives (Total : $p = 0.982$; Go : $p = 0.494$; TA : $p = 0.997$; Re : $p = 0.158$; SD : $p = 0.997$).

(Figure 28 & Figure 29)

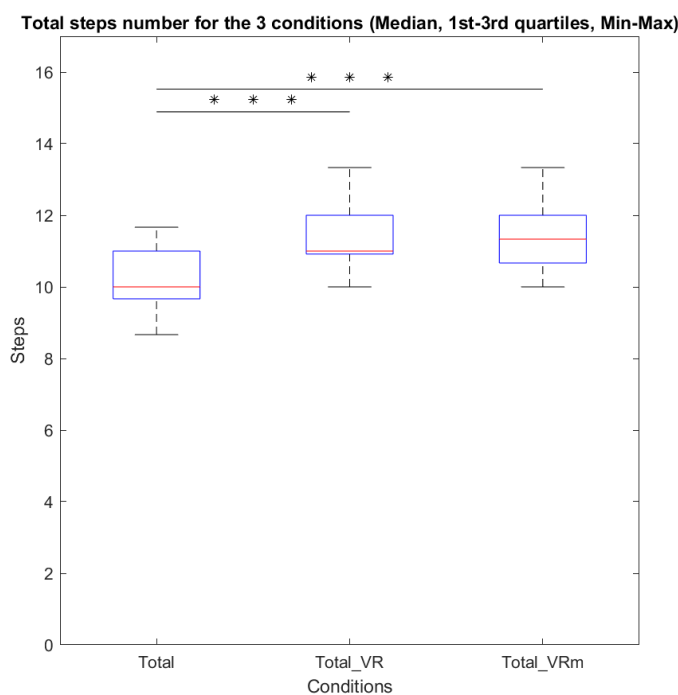


Figure 28 : Comparaison des nombres de pas totaux médians pour compléter le Timed Up and Go dans les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement") chez les Jeunes Adultes. *** $p < 0.001$.

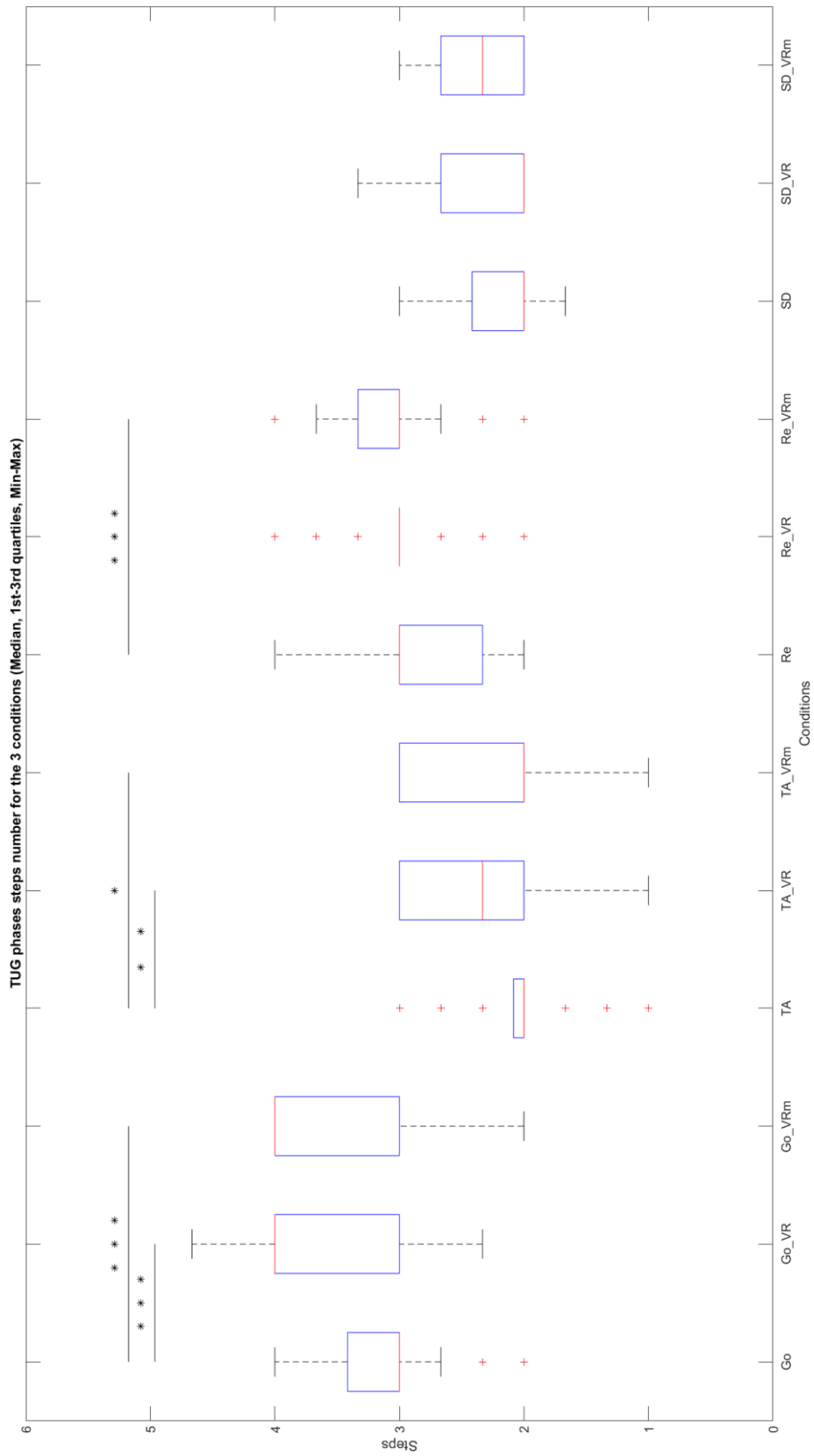


Figure 29 : Comparaison des nombres de pas médians pour chaque phase du Timed Up and Go entre les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement"), chez les Jeunes Adultes. * $p < 0.050$; ** $p < 0.010$; *** $p < 0.001$.

c) Temps pour les Personnes Agées

Les résultats montrent une augmentation du temps dans les deux conditions en réalité virtuelle par rapport à la condition « Réel » et une augmentation du temps en condition « Réalité virtuelle en mouvement » par rapport à la condition « Réalité virtuelle » excepté pour la phase de *retour* qui diminue en « Réalité virtuelle en mouvement », (Tableau 7).

- Entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle », on observe une augmentation significative du temps total ($p < 0.001$) et du temps pour les phases du Timed Up and Go (GU : $p < 0.05$; Go : $p < 0.001$; TA : $p < 0.05$; SD : $p < 0.001$) excepté la phase *retour* (Re : $p = 0.302$).
- Entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle en mouvement », le temps a augmenté significativement pour le test complet ($p < 0.001$) et chaque phase (Go : $p < 0.001$; TA : $p < 0.001$; SD : $p < 0.001$) à l'exception de la phase *se lever* et *retour* qui présentent des tendances (GU : $p = 0.053$; Re : $p = 0.053$).
- Entre les conditions « Réalité virtuelle » et « Réalité virtuelle en mouvement », le temps a augmenté mais pas de manière significative, ni pour le Timed Up and Go complet, ni pour ses phases consécutives (Total : $p = 0.740$; GU : $p = 0.906$; Go : $p = 0.740$; TA : $p = 0.253$; Re : $p = 0.676$; SD : $p = 0.858$).

(Figure 30 & Figure 31)

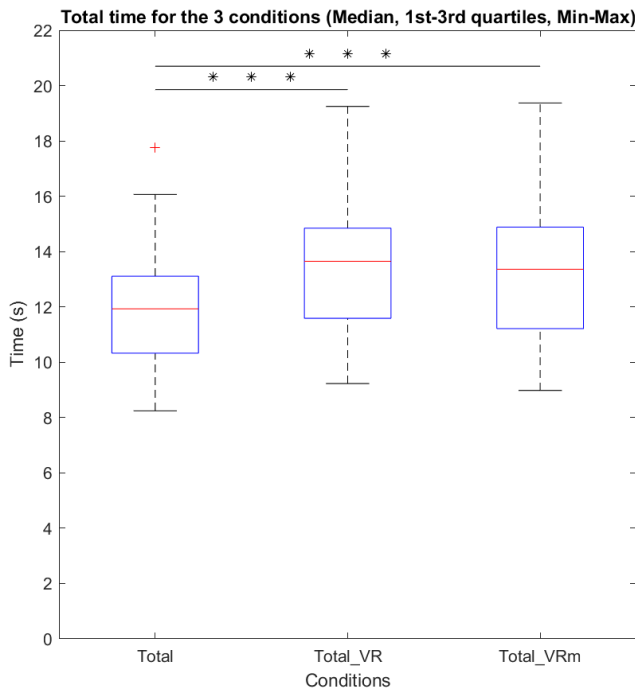


Figure 30 : Comparaison des temps totaux médians pour compléter le Timed Up and Go dans les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement") chez les Personnes Agées. *** $p < 0.001$.

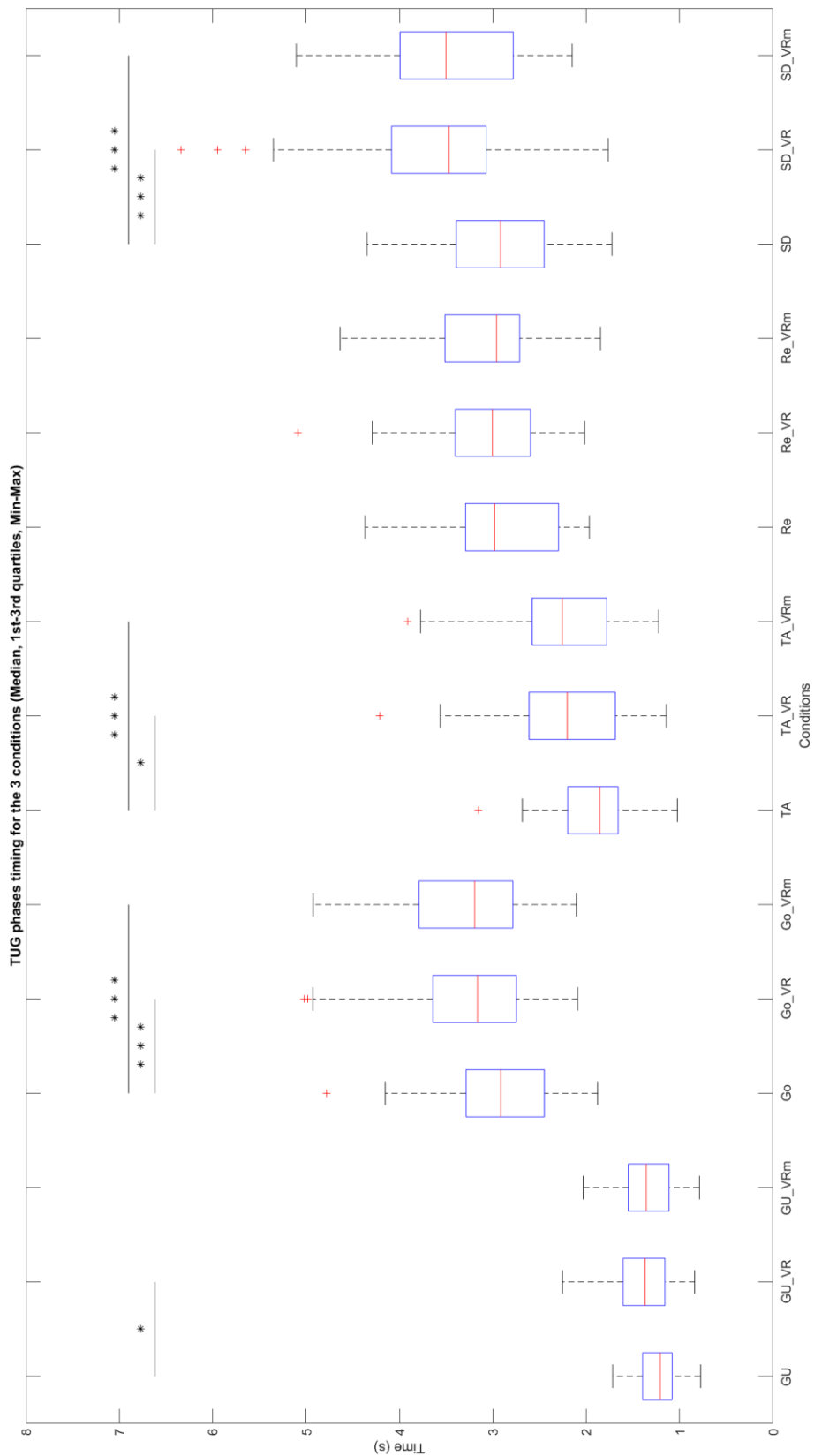


Figure 31 : Comparaison des temps médians pour chaque phase du Timed Up and Go entre les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement"), chez les Personnes Agées. * $p < 0.050$; *** $p < 0.001$.

d) Nombre de pas pour les Personnes Agées

Les résultats montrent des augmentations ou égalités concernant le nombre de pas dans les deux conditions en réalité virtuelle par rapport à la condition « Réel » et des augmentations ou égalités des nombres de pas en condition « Réalité virtuelle en mouvement » par rapport à la condition « Réalité virtuelle ». (Tableau 7)

- Entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle », le nombre de pas est significativement différent pour le test entier (Total : $p < 0.001$) et pour toutes les phases du Timed Up and Go (Go : $p < 0.001$; TA : $p < 0.05$; Re : $p < 0.01$; SD : $p < 0.001$).
- Entre les conditions « Réel » et « Réalité virtuelle en mouvement », le nombre de pas est significativement différent pour le test complet et pour les phases du Timed Up and Go (Total : $p < 0.001$; Go : $p < 0.001$; TA : $p < 0.001$; Re : $p < 0.001$; SD : $p < 0.001$).
- Entre les conditions « Réalité virtuelle » et « Réalité virtuelle en mouvement », le nombre de pas a pu être modifié mais pas de manière significative, ni pour le Timed Up and Go complet, ni pour ses phases consécutives (Total : $p = 0.278$; Go : $p = 0.527$; TA : $p = 0.312$; Re : $p = 0.644$; SD : $p = 0.998$).

(Figure 32 & Figure 33)

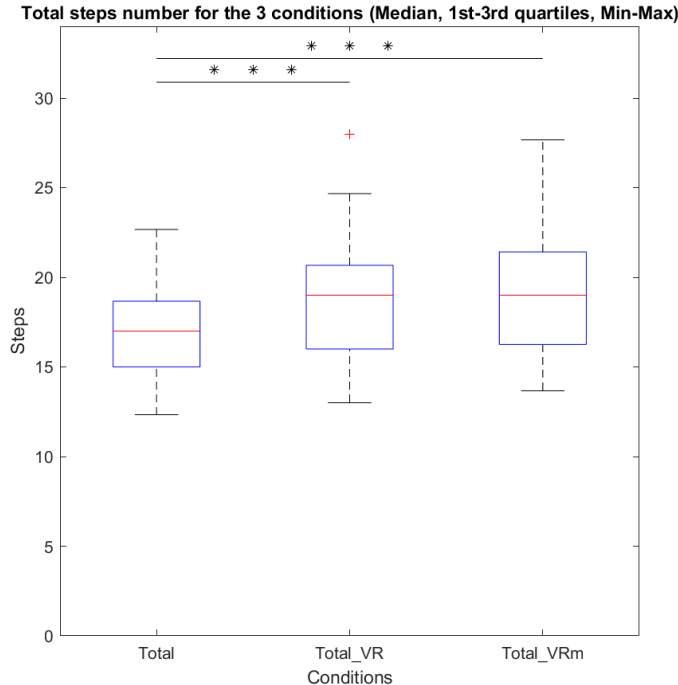


Figure 32 : Comparaison des nombres de pas totaux médians pour compléter le Timed Up and Go dans les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement") chez les Personnes Agées. *** $p < 0.001$.

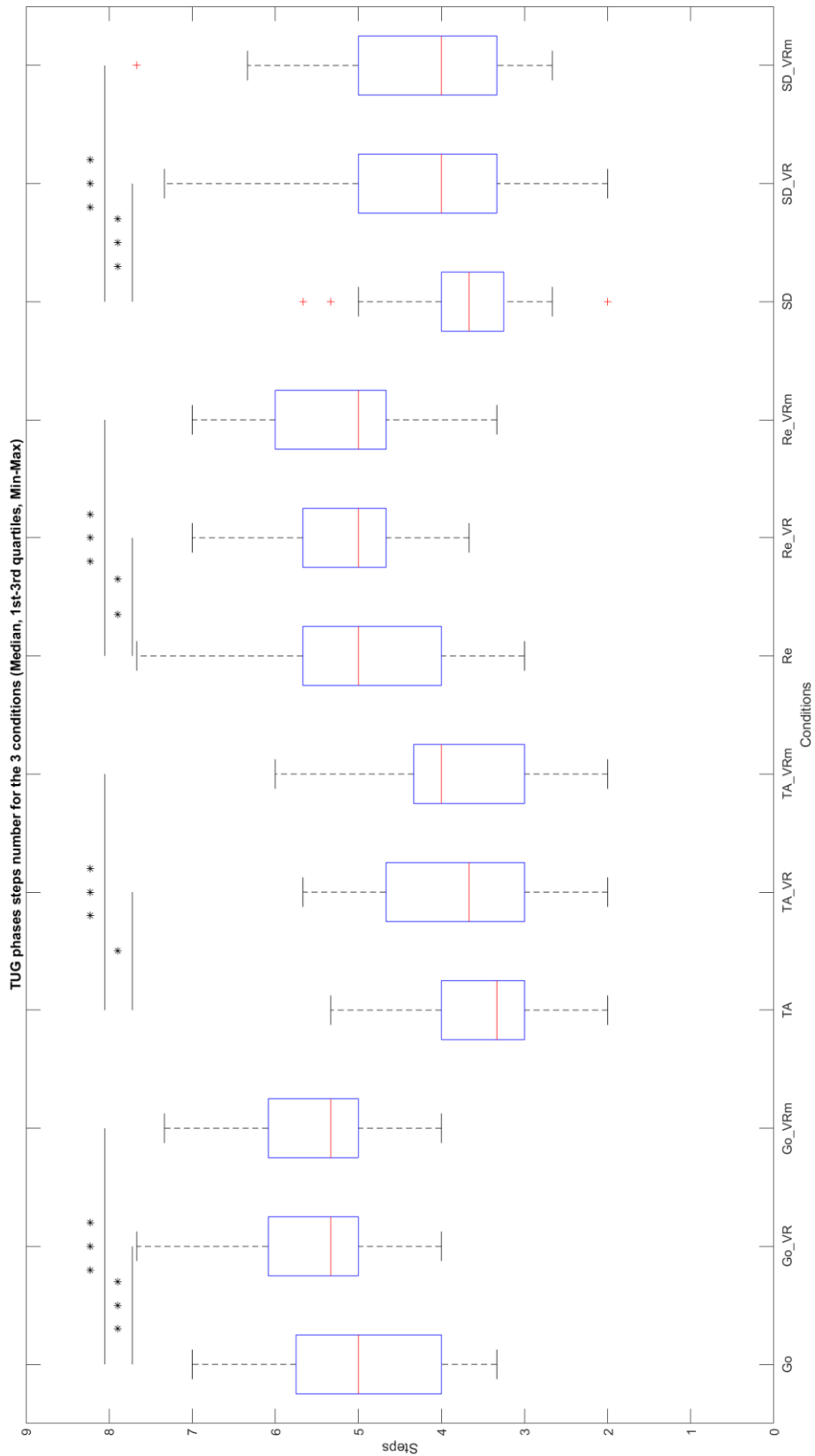


Figure 33 : Comparaison des nombres de pas médians pour chaque phase du Timed Up and Go entre les trois conditions ("Réel", "Réalité virtuelle" et "Réalité virtuelle en mouvement"), chez les Personnes Agées. * $p < 0.050$; ** $p < 0.010$; *** $p < 0.001$.

Les jeunes adultes semblent montrer un profil similaire aux personnes âgées dans la mesure où l'environnement virtuel simulant un mouvement n'affecte pas leur motricité en comparaison avec le train virtuel à l'arrêt.

e) Impact des conditions sur le temps, normalisation.

Pour pouvoir comparer l'impact des conditions sur le temps et le nombre de pas entre les populations, il a fallu normaliser les données :

- « Réalité virtuelle en mouvement » en fonction de « Réel » (VRm en % Real)
- « Réalité virtuelle » en fonction de « Réel » (VR en % Real)
- « Réalité virtuelle en mouvement » en fonction de « Réalité virtuelle » (VRm en % VR)

Les tableaux (Tableau 8 - Tableau 9) représentent cet impact pour les deux populations et mettent en évidence que les différences constatées sur les valeurs de temps et de nombre de pas sont plutôt faibles une fois rapportées à une valeur de référence.

Tableau 8 : **Jeunes Adultes**, médianes (écart interquartile) des temps et nombres de pas dans les conditions en réalité virtuelle en pourcentage d'une conditions prise en référence pour chaque phase et le total.

TUG Phase	Time			Steps		
	VRm (% Real)	VR (% Real)	VRm (% VR)	VRm (% Real)	VR (% Real)	VRm (% VR)
Get Up (GU)	106,59 (18,86)	106,70 (22,57)	101,92 (16,95)			
Go	115,18 (25,73)	116,13 (26,31)	99,21 (8,04)	111,11 (33,33)	111,11 (33,33)	100,00 (0,00)
Turn Around (TA)	121,66 (30,42)	120,09 (46,67)	100,29 (16,27)	100,00 (37,50)	100,00 (50,00)	100,00 (0,00)
Return (Re)	108,63 (32,36)	108,64 (39,30)	100,70 (11,32)	100,00 (29,76)	100,00 (22,22)	100,00 (2,27)
Sit-Down (SD)	114,20 (23,28)	109,76 (22,36)	102,62 (15,79)	100,00 (16,67)	100,00 (33,60)	100,00 (0,00)
Total	114,23 (11,73)	112,28 (13,50)	101,66 (6,28)	110,00 (12,21)	110,71 (15,08)	100,00 (5,27)

Tableau 9 : **Personnes Agées**, médianes (écart interquartile) des temps et nombres de pas dans les conditions en réalité virtuelle en pourcentage d'une conditions prise en référence pour chaque phase et le total.

TUG Phase	Time			Steps		
	VRm (% Real)	VR (% Real)	VRm (% VR)	VRm (% Real)	VR (% Real)	VRm (% VR)
Get Up (GU)	111,63 (26,85)	109,64 (32,03)	99,02 (14,67)			
Go	112,13 (22,63)	108,56 (19,64)	100,96 (6,04)	106,67 (21,63)	108,33 (20,36)	100,00 (5,34)
Turn Around (TA)	112,84 (32,51)	110,23 (28,50)	102,59 (11,98)	109,09 (18,64)	107,14 (16,67)	100,00 (18,24)
Return (Re)	106,32 (19,51)	104,73 (15,81)	101,49 (9,71)	107,14 (17,50)	107,14 (15,71)	100,00 (8,04)
Sit-Down (SD)	116,17 (29,87)	119,54 (39,68)	97,87 (19,34)	112,50 (25,00)	111,11 (25,57)	100,00 (18,13)
Total	111,73 (12,42)	112,83 (14,01)	100,64 (5,76)	108,62 (10,23)	108,89 (12,31)	101,47 (5,95)

La comparaison deux à deux des pourcentages calculés à partir des **temps** entre les jeunes adultes et les personnes âgées pour chaque phase et le Timed Up and Go complet montre :

- pour l'effet de la « Réalité virtuelle en mouvement » en pourcentage de la condition « Réel », qu'il n'y a pas de différence significative (GU : $p=0.396$; Go : $p=0.518$; TA : $p=0.251$; Re : $p=0.438$; SD : $p=0.746$; Total : $p=0.193$). (Figure 34)
- pour l'effet de la « Réalité virtuelle » en pourcentage de la condition « Réel », il n'y a pas non plus de différence significative (GU : $p=0.135$; Re : $p=0.594$; Total : $p=0.196$), avec une tendance pour les phases *aller*, *demi-tour* et *s'asseoir* (Go : $p=0.066$; TA : $p=0.081$; SD : $p=0.088$). (Figure 35)
- pour l'effet de la « Réalité virtuelle en mouvement » en pourcentage de la condition « Réalité virtuelle », il n'y a pas de différence significative (TA : $p=0.345$; Re : $p=0.916$; SD : $p=0.162$; Total : $p=0.668$) excepté pour la phase *aller* (Go : $p<0.05$) et une tendance pour la phase *se lever* (GU : $p=0.058$). (Figure 36)

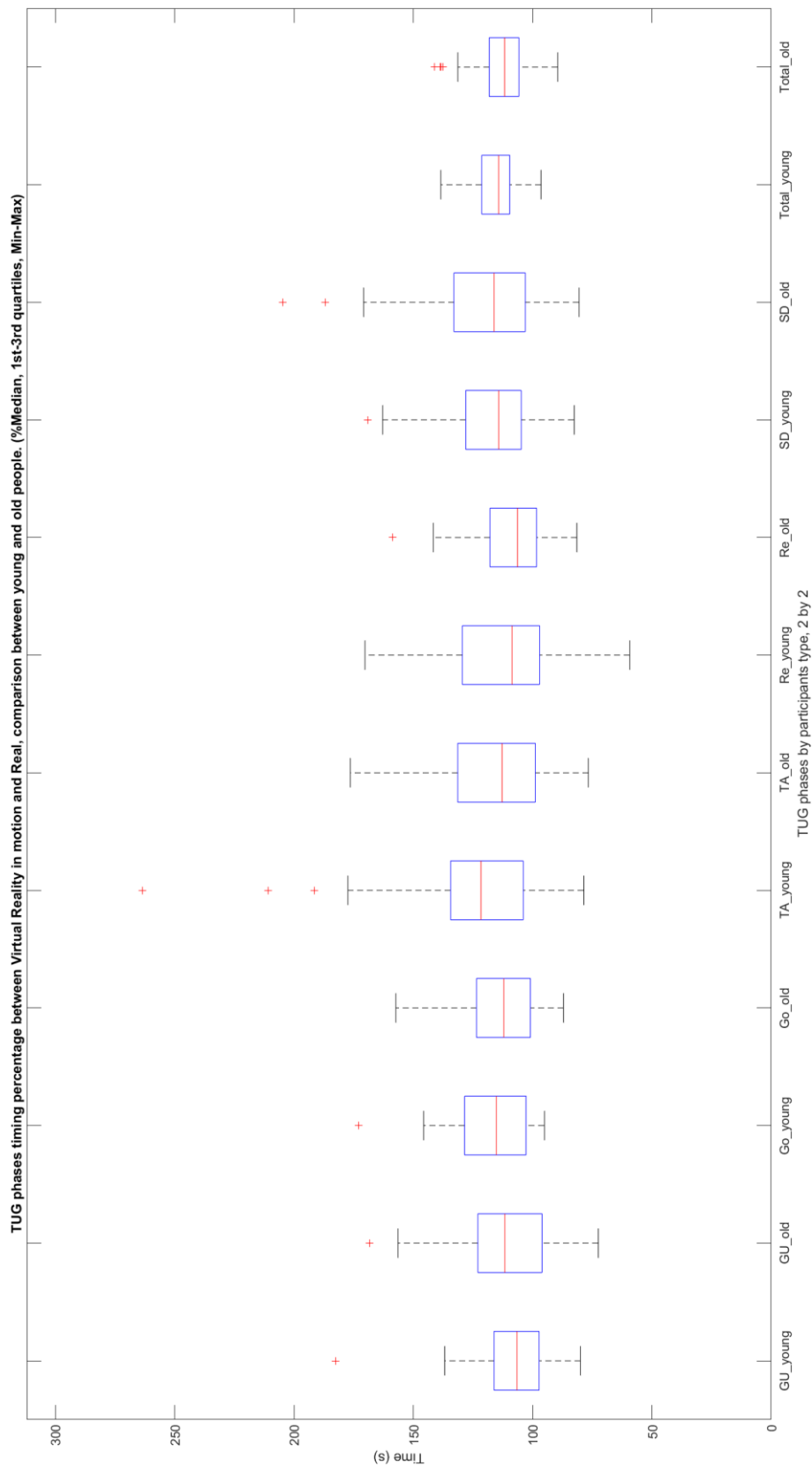


Figure 34 : Comparaisons deux à deux de l'évolution du temps en condition "Réalité virtuelle en mouvement" en pourcentage de la condition "Réel", entre les Jeunes Adultes et les Personnes Agées, pour les phases et le test complet du Timed Up and Go.

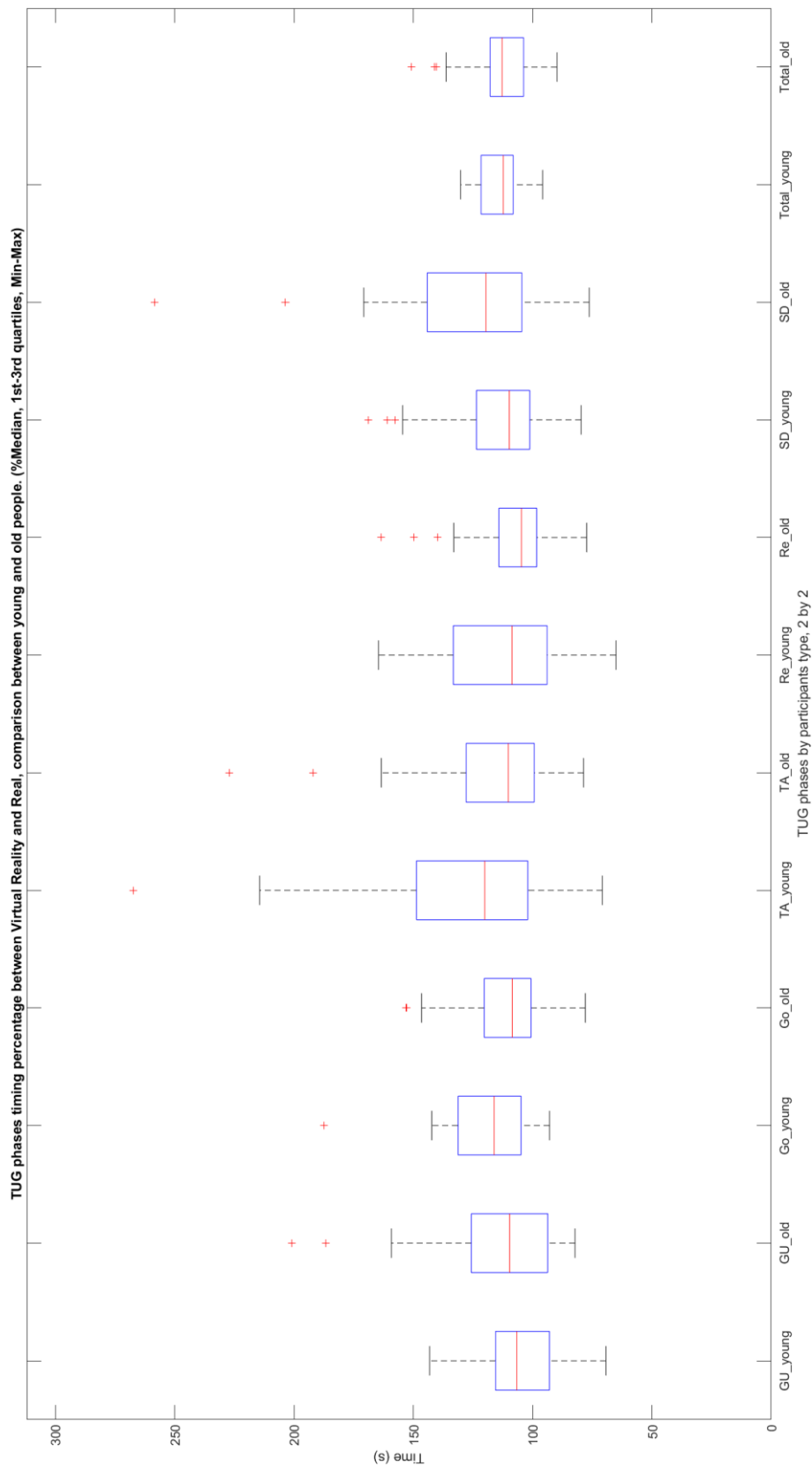


Figure 35 : Comparaisons deux à deux de l'évolution du temps en condition "Réalité virtuelle" en pourcentage de la condition "Réal", entre les Jeunes Adultes et les Personnes Agées, pour les phases et le test complet du Timed Up and Go.

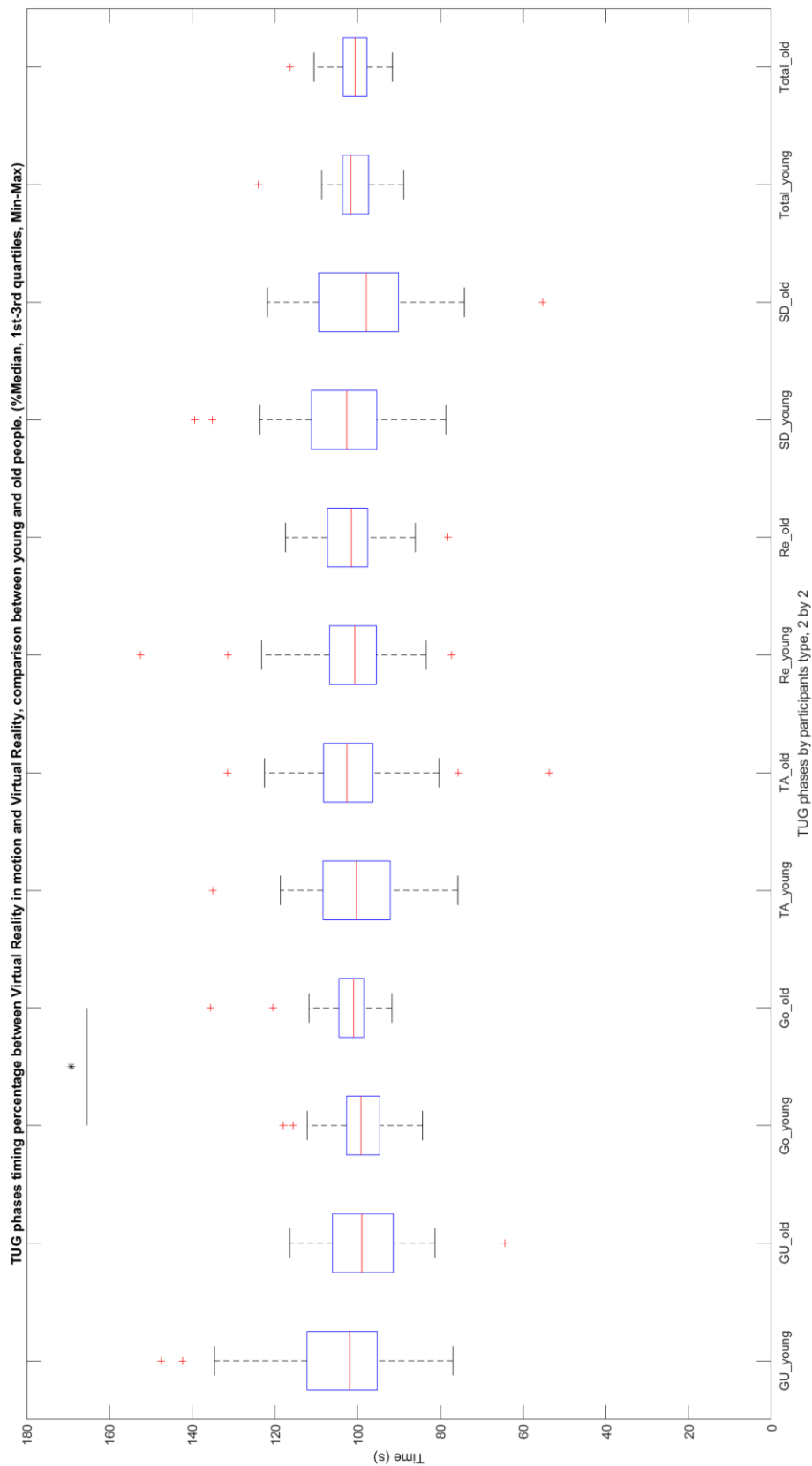


Figure 36 : Comparaisons deux à deux de l'évolution du temps en condition "Réalité virtuelle en mouvement" en pourcentage de la condition "Réalité virtuelle", entre les Jeunes Adultes et les Personnes Agées, pour les phases et le test complet du Timed Up and Go. * $p < 0.050$.

La comparaison deux à deux des pourcentages calculés à partir des **nombres de pas** entre les jeunes adultes et les personnes âgées pour chaque phase et le Timed Up and Go complet montre :

- pour l'effet de la « Réalité virtuelle en mouvement » en pourcentage de la condition « Réel », qu'il n'y a pas de différence significative (Go : $p=0.514$; TA : $p=0.813$; Re : $p=0.817$; Total : $p=0.552$), la phase *s'asseoir* présente une tendance (SD : $p=0.051$). (Figure 37)
- pour l'effet de la « Réalité virtuelle » en pourcentage de la condition « Réel », qu'il n'y a pas non plus de différence significative (Go : $p=0.122$; TA : $p=0.347$; Re : $p=0.784$; Total : $p=0.541$), avec une tendance pour la phase *s'asseoir* (SD : $p=0.064$). (Figure 38)
- pour l'effet de la « Réalité virtuelle en mouvement » en pourcentage de la condition « Réalité virtuelle », il y a une différence significative pour la phase *aller* (Go : $p<0.05$). Les autres phases et le total ne présente pas de différence significative (TA : $p=0.120$; Re : $p=0.569$; SD : $p=0.842$; Total : $p=0.266$). (Figure 39)

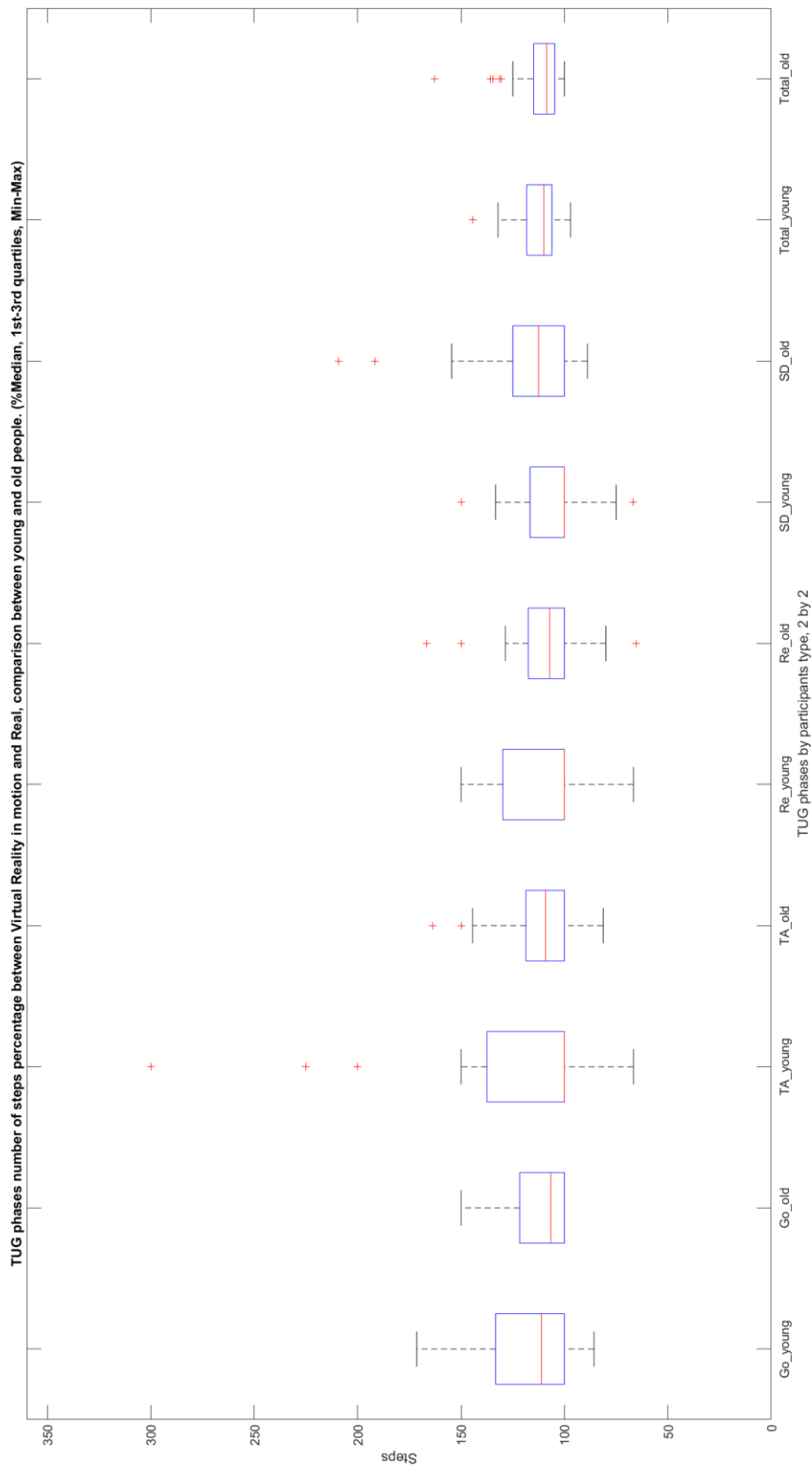


Figure 37 : Comparaisons deux à deux de l'évolution du nombre de pas en condition "Réalité virtuelle en mouvement" en pourcentage de la condition "Réel", entre les Jeunes Adultes et les Personnes Agées, pour les phases et le test complet du Timed Up and Go.

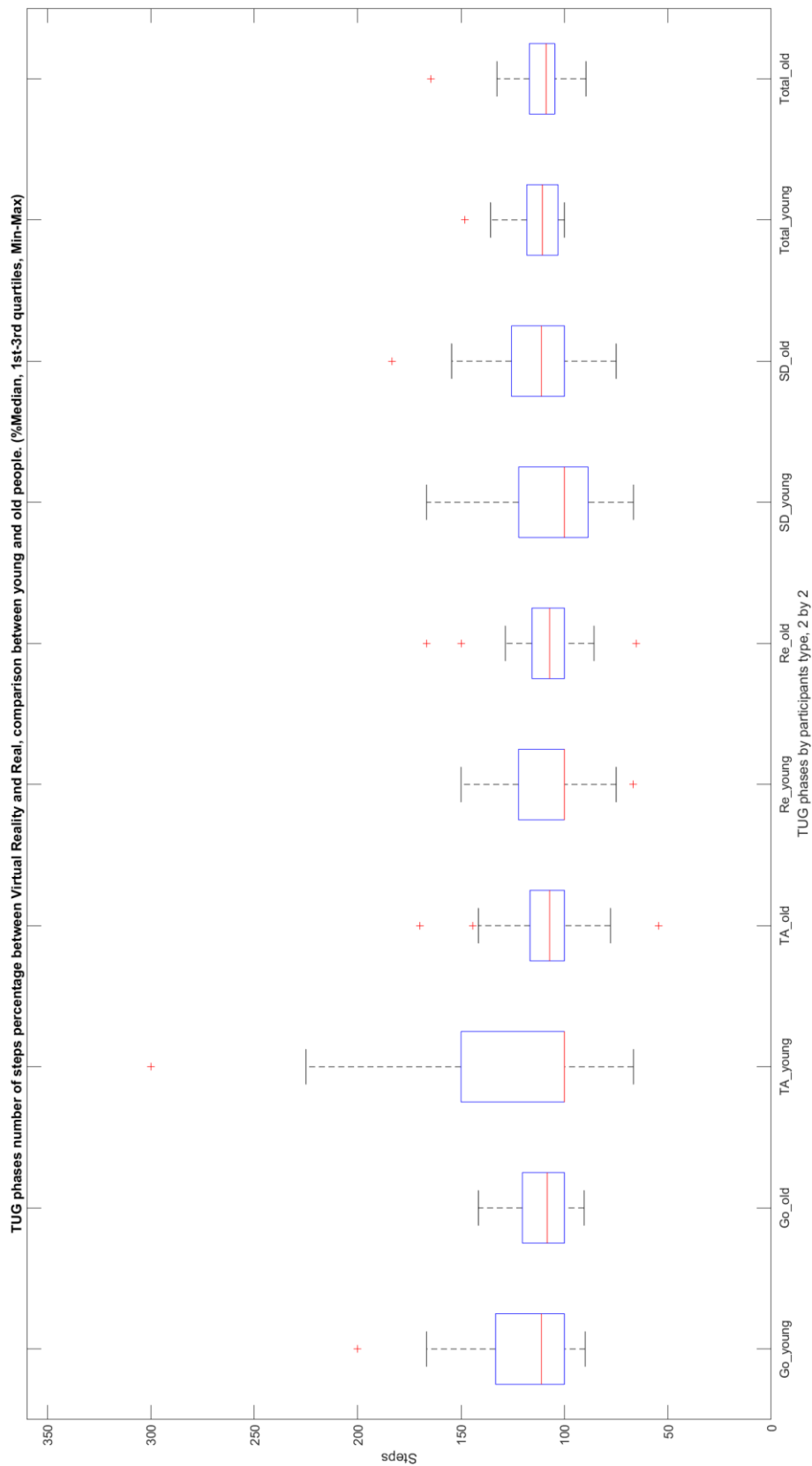


Figure 38 : Comparaisons deux à deux de l'évolution du nombre de pas en condition "Réalité virtuelle" en pourcentage de la condition "Réal", entre les Jeunes Adultes et les Personnes Agées, pour les phases et le test complet du Timed Up and Go.

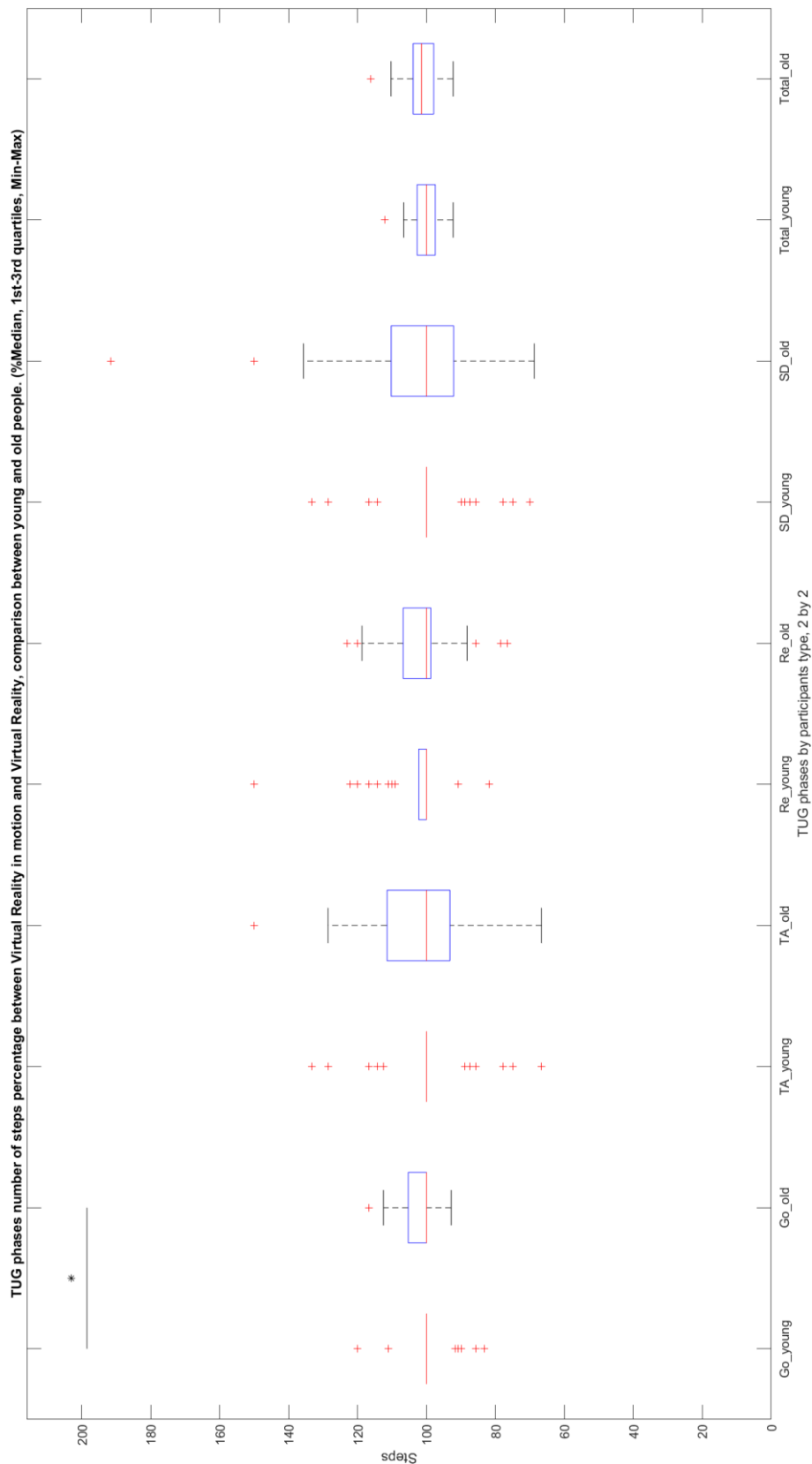


Figure 39 : Comparaisons deux à deux de l'évolution du nombre de pas en condition "Réalité virtuelle en mouvement" en pourcentage de la condition "Réalité virtuelle", entre les Jeunes Adultes et les Personnes Agées, pour les phases et le test complet du Timed Up and Go. * $p < 0.050$.

Les comparaisons multiples destinées à mettre en évidence un effet d'âge et ou de genre sur le **temps** montrent :

- pour l'effet de la « Réalité virtuelle » en pourcentage de la condition « Réel », un effet significatif du genre sur les phases *se lever* et *retour* ($p < 0.05$) et un effet de l'âge sur la phase de *demi-tour* ($p < 0.05$) (Tableau 10).
- pour l'effet de la « Réalité virtuelle en mouvement » en pourcentage de la condition « Réel », un effet significatif du genre sur la phase de *retour* ($p < 0.01$) et un effet de l'âge et du genre sur la phase de *demi-tour* ($p < 0.05$) (Tableau 11).
- pour l'effet de la « Réalité virtuelle en mouvement » en pourcentage de la condition « Réalité virtuelle », un effet significatif de l'âge sur la phase *aller* ($p < 0.01$) (Tableau 12).

Les comparaisons multiples destinées à mettre en évidence un effet d'âge et ou de genre sur le **nombre de pas** montrent :

- pour l'effet de la « Réalité virtuelle » en pourcentage de la condition « Réel », un effet significatif de l'âge sur les phases *aller* et *demi-tour* ($p < 0.05$) et un effet de l'âge et du genre sur les phases de *demi-tour* et *retour* ($p < 0.05$) (Tableau 10).
- pour l'effet de la « Réalité virtuelle en mouvement » en pourcentage de la condition « Réel », un effet significatif de l'âge et du genre sur la phase de *demi-tour* ($p < 0.05$) (Tableau 11).
- pour l'effet de la « Réalité virtuelle en mouvement » en pourcentage de la condition « Réalité virtuelle », un effet significatif de l'âge sur la phase *aller* ($p < 0.01$) (Tableau 12).

Tableau 10 : Comparaisons multiples des effets d'âge et de genre sur la condition Réalité Virtuelle (VR) normalisée en pourcentage de la condition Réel (* : $p < 0.05$), pour le temps et le nombre de pas, phase par phase et sur le test complet.

Parameter	Variable	GU F(1,86)	Go F(1,86)	TA F(1,86)	Re F(1,86)	SD F(1,86)	Total F(1,86)
Time	Age	1,32	2,57	4,40*	0,01	2,9	0,25
	Gender	4,27*	0,88	0,28	6,78*	0	2,14
	Age * Gender	3,52	1,19	3,89	1,39	0,23	0,88
Steps	Age		4,13*	5,15*	0,27	1,47	1,39
	Gender		0,72	0,89	1,72	0,01	0,89
	Age * Gender		0,32	5,31*	4,07*	0,7	0,92

Tableau 11 : Comparaisons multiples des effets d'âge et de genre sur la condition Réalité Virtuelle en mouvement (VRm) normalisée en pourcentage de la condition Réel (* : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$), pour le temps et le nombre de pas, phase par phase et sur le test complet.

Parameter	Variable	GU F(1,86)	Go F(1,86)	TA F(1,86)	Re F(1,86)	SD F(1,86)	Total F(1,86)
Time	Age	0,02	0,11	2,7	0,02	0,785	0,23
	Gender	1,61	2,73	0,48	8,02**	0,16	3,16
	Age * Gender	1,12	0,04	4,28*	1,22	0,02	0,11
Steps	Age		0,72	3,03	0,01	2	0,14
	Gender		0,26	1,37	2,6	0,02	1
	Age * Gender		0,93	3,96*	2,48	0	0,03

Tableau 12 : Comparaisons multiples des effets d'âge et de genre sur la condition Réalité Virtuelle en mouvement (VRm) normalisée en pourcentage de la condition Réalité Virtuelle (VR) (* : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$), pour le temps et le nombre de pas, phase par phase et sur le test complet.

Parameter	Variable	GU F(1,86)	Go F(1,86)	TA F(1,86)	Re F(1,86)	SD F(1,86)	Total F(1,86)
Time	Age	3,34	8,14**	1,68	1,4	1,47	0,01
	Gender	0,78	1,44	0,03	2,3	0,7	0,45
	Age * Gender	1,83	1,54	0,11	0,39	0,19	1,02
Steps	Age		8,94**	3,26	1,66	0,27	3,03
	Gender		0,27	0,54	0,28	0,13	0
	Age * Gender		1,53	1,66	0,96	2,71	3,47

5.4.4. Discussion

Cette étude avait pour objectif de comparer l'évolution de paramètres spatio-temporels pour réaliser le Timed Up and Go selon différentes conditions en réalité virtuelle et en réel entre un échantillon de personnes âgées et un échantillon de jeunes adultes. On sait qu'il existe des différences entre ces deux populations de par les caractéristiques du contrôle moteur, de l'équilibre et de la démarche affectant la motricité. En effet, les personnes âgées contrairement aux jeunes adultes ont en particulier une diminution de leur coordination motrice, une augmentation de la variabilité et de la lenteur des mouvements effectués [252, 253, 254]. Lors de la marche par exemple, la vitesse diminue, la fréquence de pas augmente tandis que la longueur de pas diminue [255]. Les résultats de l'étude révèlent effectivement ces différences de comportement moteur lors de la réalisation du Timed Up and Go classique. Les personnes âgées mettent en moyenne deux fois plus de temps, environ 12 secondes contre 6 secondes chez les jeunes adultes, pour réaliser la tâche au complet et effectuent 7 à 8 pas de plus que ces derniers. Les personnes âgées emploient ainsi une compensation de la réduction de leurs capacités physiques en adoptant une stratégie motrice plus sécurisante, plus prudente et qui diminue leur dépense énergétique lors du mouvement [256].

L'intérêt de cette étude est ainsi de quantifier les effets de la réalité virtuelle sur la performance motrice puis de déterminer l'effet de l'âge et du genre sur l'influence de la réalité virtuelle.

Tout d'abord, l'ajout de réalité virtuelle (conditions « Réalité Virtuelle » et « Réalité Virtuelle en mouvement ») a une influence sur le contrôle moteur des personnes âgées étudiées. Cela s'est traduit par une augmentation significative du nombre de pas et du temps mis pour effectuer la tâche en condition « Réalité Virtuelle » comparé à la tâche en condition « Réel ». Dans le détail, toutes les phases du Timed Up and Go sont concernées par ces augmentations. En revanche, concernant la comparaison des deux conditions « Réalité Virtuelle » et « Réalité Virtuelle en mouvement », on ne retrouve pas de différence significative au sein de la population âgée. Les résultats mentionnés sont ainsi cohérents avec les résultats de l'étude #2 qui évaluait elle aussi un échantillon de personnes âgées sur les mêmes *scenarii* et pour lesquels les profils mesurés suivent exactement les mêmes évolutions, à savoir un « effet réalité virtuelle ».

Concernant les jeunes adultes, on remarque que les évolutions de ces paramètres spatio-temporels mesurés suivent la même tendance que les personnes âgées, avec des augmentations significatives entre les conditions « Réalité Virtuelle » et « Réel » mais sans différence entre « Réalité Virtuelle » et « Réalité Virtuelle en mouvement ». Cela indique une fois de plus que

le scénario du train en mouvement avec sonorités et défilement du paysage n'aurait pas d'influence significative sur le contrôle moteur par rapport au scénario train à l'arrêt. L'argument essentiellement avancé pour expliquer ce résultat est lié à la structure du train qui offre de multiples points fixes où le regard peut se stabiliser pour maîtriser son équilibre, ce qui néglige en partie le flux linéaire optique du paysage qui défile. De plus, la parallaxe du mouvement fournit des repères visuels plus précis pour l'équilibre corporel dans la structure du train qui entoure le sujet que dans le plus paysage plus éloigné comme expliqué dans l'étude #2, cette capacité d'intégration sensorielle n'étant par ailleurs pas affectée par l'âge [257]. Enfin, l'attention des sujets est essentiellement centrée sur la réalisation de la tâche le plus vite possible sans prêter trop de ressources attentionnelles aux informations périphériques.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la réalité virtuelle réduit les performances au Timed Up and Go pour les deux populations. Almajid *et al.* observent les mêmes effets sur le Timed Up and Go en utilisant également de la réalité virtuelle immersive, quoi qu'on puisse considérer que la méthode utilisée puisse plutôt s'apparenter à de la réalité augmentée [258]. Cela augure ainsi des adaptations, des profils de comportements moteurs similaires pour les personnes âgées et les jeunes adultes soumis aux différents *scenarii* en réalité virtuelle. Cela signifierait qu'il existe un « effet réalité virtuelle » pour les deux populations qui serait indépendant de l'âge. Pour le vérifier, il a été réalisé une normalisation des résultats dans le but de comparer ces évolutions entre les deux populations, afin de mesurer si cet effet est équivalent ou s'il impacte davantage une catégorie d'âge. Dans la même optique, il a également été comparé si « l'effet réalité virtuelle » était équivalent en fonction du genre.

Les comparaisons inter-individuelles normalisées entre les deux populations ont montré qu'aucun effet d'âge ne s'ajoutait à l'influence de la réalité virtuelle sur la réalisation du Timed Up and Go complet. En effet, on retrouve une augmentation du temps et du nombre de pas proportionnellement équivalente pour les personnes âgées et les jeunes adultes entre les conditions « Réalité Virtuelle », « Réalité Virtuelle en mouvement » et « Réel ». La tâche demandée étant peu sollicitante d'un point de vue cognitif et les personnes âgées soumises à l'étude étant non-chuteuses, leurs adaptations (surface de déplacement du centre de pression, vitesse d'oscillations corporelles) et stratégies posturales, dans ce contexte, ne se distinguent ainsi pas fondamentalement de celles de jeunes adultes [259]. Le comportement moteur retrouvé pour les deux populations s'est traduit par une stratégie motrice employée similaire, avec une baisse de la vitesse de marche sous-tendant l'augmentation du temps pour réaliser la tâche. Ces modifications peuvent être liées au port du visiocasque en lui-même en imposant des contraintes perceptives et biomécaniques qui augmentent le poids sur la tête et qui modifient

l'estimation des distances [260]. Le visiocasque immerge la personne dans un environnement virtuel simulant un train, un environnement cohérent, mais l'utilisation de cette nouvelle technologie crée un contexte environnemental tout à fait nouveau et inconnu. Les participants n'ayant pas vécu d'expérience en réalité virtuelle immersive auparavant, il a été montré que les réactions cognitives et émotionnelles pouvaient donc être modulées en fonction d'un contexte environnemental nouveau et que cela pouvait induire la modification des paramètres moteurs de la marche en particulier, notamment la vitesse [261]. D'autres explications peuvent s'ajouter : ne pas voir son corps peut être perturbant et limiter les repères visuels. Il a aussi été constaté qu'il y avait moins d'anticipation à l'amorce des phases de demi-tour et d'assise en réalité virtuelle, ces deux phases étant situées consécutivement à des phases de marche, elles induisent ainsi mécaniquement une augmentation du nombre de pas et du temps lors des phases d'aller et de retour prises isolément.

Même si, de manière générale, les adaptations comportementales semblent similaires en fonction de la catégorie d'âge et du genre, on observe quand même des différences significatives au cours de plusieurs phases du Timed Up and Go en fonction de la condition réalisée, qui peuvent refléter des stratégies d'adaptation employées différentes.

La phase *se lever* est réalisée avec la même évolution de temps pour les personnes âgées et les jeunes adultes entre les différentes conditions proposées. Le contact avec la chaise peut expliquer ce résultat, car le mouvement implique un faible impact des informations visuelles liées à l'environnement, mais sollicite davantage des indices proprioceptifs et kinesthésiques pour contrôler l'équilibre postural. La balance sensorielle est modulée en fonction de différents facteurs tels que la tâche, l'expérience ou encore l'âge, l'utilisation privilégiée des informations proprioceptives permet de mieux contrôler ses oscillations posturales [262]. Il n'y a donc pas de difficulté conséquente ajoutée par la réalité virtuelle. En revanche, on remarque une différence de genre, avec plus de temps chez les femmes que chez les hommes en réalité virtuelle. On note que cette différence de genre est majoritairement marquée entre les femmes et hommes âgés, des arguments en ce sens peuvent justifier ce résultat. Les femmes étaient en moyenne de plus petite taille que les hommes, on a pu observer qu'elles utilisaient l'extension de leurs membres inférieurs vers l'avant pour créer un contrepoids et pouvoir projeter leur corps vers l'avant pour se mettre debout. Cela implique ainsi une perte de temps par rapport aux hommes, plus grands et qui avaient donc un ancrage plus aisé des membres inférieurs au sol. Cet ancrage leur a permis d'avoir une mobilité accrue et donc une utilisation des appuis plus efficace pour se mettre debout. Chez les jeunes, la différence est moindre en raison d'un tonus musculaire supérieur et indépendant du genre, contrairement aux personnes âgées qui sont

affectées par une diminution du tonus musculaire [39, 40, 41, 42]. Bénéficiant de cet avantage musculaire, les jeunes adultes se levaient en projetant directement le buste vers l'avant dans une action combinée des abdominaux et des bras sur les accoudoirs. Cette projection tonique leur permettait également d'enchaîner immédiatement avec de la marche vers l'avant, là où les personnes âgées avaient tendance adopter une posture érigée avec une certaine stabilité avant d'engager la marche vers l'avant.

La phase de *demi-tour* nécessite un changement d'orientation corporelle avec utilisation de repères visuels et kinesthésiques qui doit être anticipé au cours de la phase de marche [263]. Elle est significativement augmentée chez les jeunes adultes par rapport aux personnes âgées. Entre le *demi-tour* en condition Réalité Virtuelle et le *demi-tour* en condition Réel, les jeunes mettent plus de temps et de pas, on peut l'expliquer par le fait qu'en Réel cela est géré de manière stable, reproductible, avec peu de ressources attentionnelles dédiées, permettant une bonne anticipation de la rotation à l'approche des 3 mètres. En réalité virtuelle, cette phase semble nécessiter d'adopter un contrôle moteur supérieur étant donné que le champ de vision vertical est plus limité, et que le repère du demi-tour matérialisé par la valise nécessite une motricité plus fine pour s'en approcher sans la toucher. Il est à noter que l'utilisation d'un visiocasque réduit le champ de vision utile [258], zone dans laquelle les informations utiles pour contrôler l'équilibre postural à un instant t sont extraites sans mouvement des yeux ou de la tête [264]. Chez les personnes âgées, réaliser un demi-tour nécessite en permanence un contrôle exécutif important. De plus, étant donnée la réduction des capacités visuelles et notamment du champ de vision lié au vieillissement [26], il est possible que les personnes âgées soient moins affectées par le champ de vision limité du visiocasque que les jeunes adultes qui subissent, en proportion une plus importante diminution de ce champ de vision avec le port du visiocasque. Ces différences entre la condition « Réel » et les deux autres en Réalité virtuelle ont potentiellement affecté de manière plus prononcée les jeunes adultes lors de la phase de demi-tour. Cette baisse d'anticipation avant de réaliser la rotation est d'ailleurs corrélée à une augmentation du nombre de pas sur la phase Go chez les jeunes adultes.

La phase *s'asseoir* est la plus complexe pour le contrôle postural. Chez les personnes âgées, deux stratégies étaient employées pour réaliser cette tâche. Soit coordonner le déplacement avec la phase d'assise, c'est à dire en pivotant et en se penchant simultanément, soit en sectionnant ces deux parties en réalisant d'abord un demi-tour puis l'assise, méthode qui permet de contrôler plus aisément son équilibre. L'étude #1 montre que l'effet réalité virtuelle augmente le temps alloué à la réalisation de cette phase, car nombre de sujets cherchaient à toucher la chaise avant de s'asseoir dessus afin d'être rassuré sur son emplacement précis [227].

Chez les jeunes adultes, c'est la première option qui est utilisée, puisqu'ils ont des capacités fonctionnelles optimales pour réaliser cette phase de manière la plus efficace possible, on aurait pu ainsi s'attendre à voir des différences significatives entre les catégories d'âge. Il s'avère que non, la réalité virtuelle influence donc de manière équivalente les deux populations. Le recours aux informations proprioceptives et haptiques en touchant la chaise au détriment de l'utilisation des informations visuelles peuvent, tout comme la phase *se lever*, expliquer qu'on retrouve un même « effet réalité virtuelle ».

Enfin les phases *aller* et *retour*, qui consistaient à marcher 3 mètres, sont impactées différemment. D'une part car elles succèdent ou précèdent des phases du Timed Up and Go n'étant pas les mêmes et n'ayant donc pas les mêmes conséquences sur les adaptations motrices, et d'autre part car les repères visuels offerts par le train varient en fonction du sens de déplacement. Dans la condition train en mouvement, à l'aller le paysage défile dans le même sens que le sujet alors qu'au retour il défile en sens inverse. Des études ont montré que la manipulation du flux visuel optique en réalité virtuelle avait une influence sur la vitesse de marche, celle-ci semble toutefois négligeable chez les personnes saines [265, 266]. Enfin, lors de la phase *aller*, il n'y a pas de support physique sur lequel se rattraper à 3 mètres, à l'endroit du *demi-tour*, tandis que dans la phase de *retour*, la chaise est un support physique sur lequel s'appuyer en cas de déséquilibre au moment de *s'asseoir*. Cela a probablement un impact psychologique sur l'engagement à réaliser la phase de marche rapidement. Ces critères peuvent donc avoir une influence sur les paramètres spatio-temporels de la locomotion. Ainsi, à l'*aller*, dans le train en mouvement par rapport au train à l'arrêt, les personnes âgées mettent significativement plus de temps et plus de pas pour le réaliser tandis qu'au retour, on ne retrouve pas de différence, on constate ainsi une influence différente en fonction du sens de la marche, pour les raisons évoquées précédemment. Cela nous amène à penser que les personnes âgées emploient une adaptation motrice relevant d'une stratégie plus sécurisante quand le paysage défile dans le même sens. Chez les jeunes, c'est l'inverse, il existe un effet positif du défilement du paysage vers l'avant puisqu'ils mettent moins de temps à réaliser l'aller dans le train en mouvement qu'à l'arrêt, peut-être dû au flux linéaire optique qui avance en même temps qu'eux et qui les entraîne à aller plus vite vers l'avant, même s'il faut nuancer cela avec la faible distance à parcourir. De plus, la peur de chuter n'étant a priori pas présente pour cette population de jeunes adultes, la présence de support physique sur lequel se rattraper entre certainement moins en considération. Concernant la phase de *retour*, il n'y a pas de différence d'âge, mais une différence de genre sur le temps mis à effectuer les 3 mètres en réalité virtuelle, les femmes mettant plus de temps que les hommes, essentiellement chez les jeunes. Cela peut s'expliquer

par plus d'appréhension chez les jeunes femmes à débiter précocement leur rotation pour anticiper l'assise, augmentant ainsi le temps à la phase du retour. Elles ont potentiellement moins confiance et sont plus prudentes quant au placement de la chaise virtuelle par rapport à la chaise réelle pour s'asseoir alors que les hommes s'engagent avec aisance et semble avoir confiance en la technologie ou en leur capacités à se rattraper au cas où. Ils écourtent donc leur phase de retour pour débiter rapidement la rotation avant de s'asseoir. Une étude dans un environnement virtuel montre en ce sens que les hommes se sentent plus présents et ressentent plus de réalisme que les femmes [267]. Il n'y a pas de différence supplémentaire de genre au sein des personnes âgées, cela semble en cohérence avec l'étude de Almajid et Keshner en 2019, qui évalue la réalisation du « Timed Up and Go » avec une double tâche cognitivo-motrice, les résultats montrent qu'il n'y a aucune différence de genre sur les paramètres spatio-temporels [268].

Cette étude a permis de confirmer qu'il existait un effet de la réalité virtuelle sur le comportement moteur des personnes âgées et des jeunes adultes, hommes et femmes confondus, confirmant les résultats des études précédentes (#1 et #2). L'utilisation de la réalité virtuelle réduit la performance motrice mais cet effet semble indépendant de l'âge et du genre sur les paramètres spatio-temporels au « Timed Up and Go » sur sa totalité. L'étude a néanmoins montré que certaines phases pouvaient être affectées différemment entre jeunes adultes et personnes âgées. Certaines phases nécessitant un contrôle postural plus fin semblent appréhendées avec plus ou moins de confiance en fonction de la population étudiée. La réalité virtuelle porte l'avantage de créer des environnements virtuels reproductibles, aménageables et adaptables en temps réel en fonction des besoins, on pourrait imaginer davantage augmenter le réalisme des *scenarii* en y ajoutant obstacles, interactions physiques et sociales. On pourrait également coupler les *scenarii* avec de la métrologie humaine et diminuer l'isolement du casque en affichant un avatar corps complet.

5.5. Etude #4 : Age impact on presence feeling in immersive virtual reality.

5.5.1. Objectifs et hypothèses

Dans l'étude #1, nous avons pu évaluer le sentiment de présence chez des personnes âgées sans pouvoir comparer les résultats à une quelconque référence. Les résultats obtenus vont alors servir eux-mêmes de référence pour pouvoir comparer le sentiment de présence obtenu chez de jeunes adultes. L'objectif de cette étude était de comparer le sentiment de présence perçu par des personnes âgées comparativement à de jeunes adultes dans une expérience virtuelle équivalente. Une hypothèse était que l'expérience vidéo ludique et technologique des jeunes adultes soit plus importante que celle des personnes âgées et qu'ils soient simplement moins impressionnés et par conséquent aient un sentiment de présence plus faible que les participants âgés.

5.5.2. Méthodologie spécifique

Pour rappel, 31 personnes âgées (20F-11H, 73.7 ± 9 ans, de l'étude #1) ainsi que 60 jeunes adultes (36F-24H, 21.5 ± 1.4 ans) ont participé à l'étude. Pour cette campagne de mesure, la normalité et l'homogénéité des variances ont été testées, seul un des items (INV) a été comparé à l'aide du test paramétrique T de Student pour échantillons indépendants, les autres, ne suivant pas la loi normale ont été comparés à l'aide du U de Mann-Whitney. Le seuil de signification est fixé à $\alpha < 0.05$. Les résultats sont présentés sous la forme de médianes (écart interquartile).

5.5.3. Résultats

Tableau 13 : Résultats au questionnaire IPQ chez les jeunes adultes et les personnes âgées - Médiane (écart interquartile).

	G		INV		REAL		SP		Total	
	Young	G Old	Young	INV Old	Young	Old	Young	Old	Young	Old
Scores	1 (1)	(1,75)	0,375 (1,5)	0,25 (1,875)	0 (1,25)	1 (1,375)	1,3 (1,1)	1,6 (1,35)	9,5 (14,5)	16 (12,25)

Les résultats montrent des médianes plus élevées chez les personnes âgées pour tous les items, à l'exception de l'item implication (INV) qui est plus exprimé chez les jeunes adultes (Tableau 13 & Figure 40).

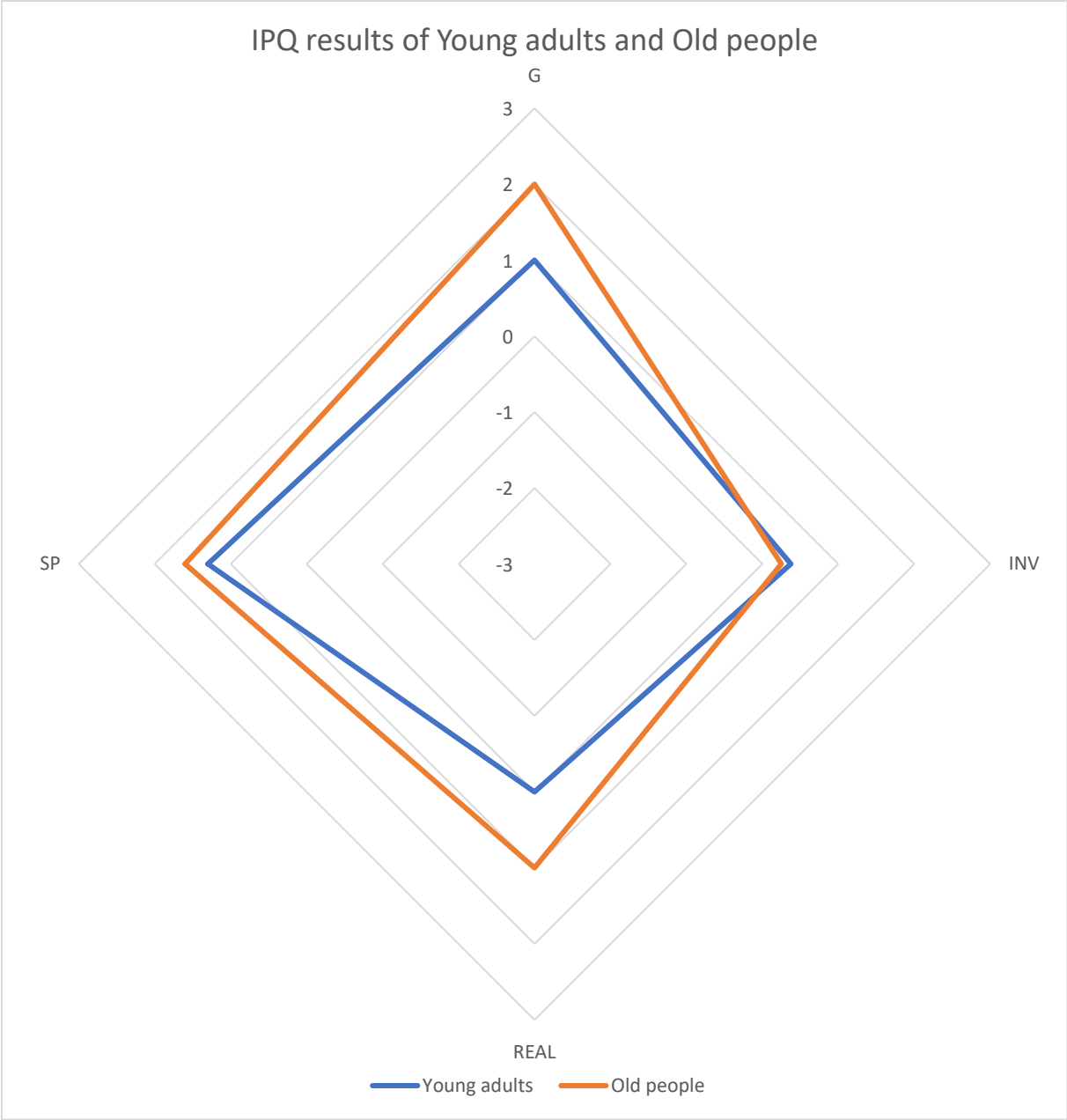


Figure 40 : Représentation graphique des scores médians pour chaque item du questionnaire IPQ chez les jeunes adultes et les personnes âgées.

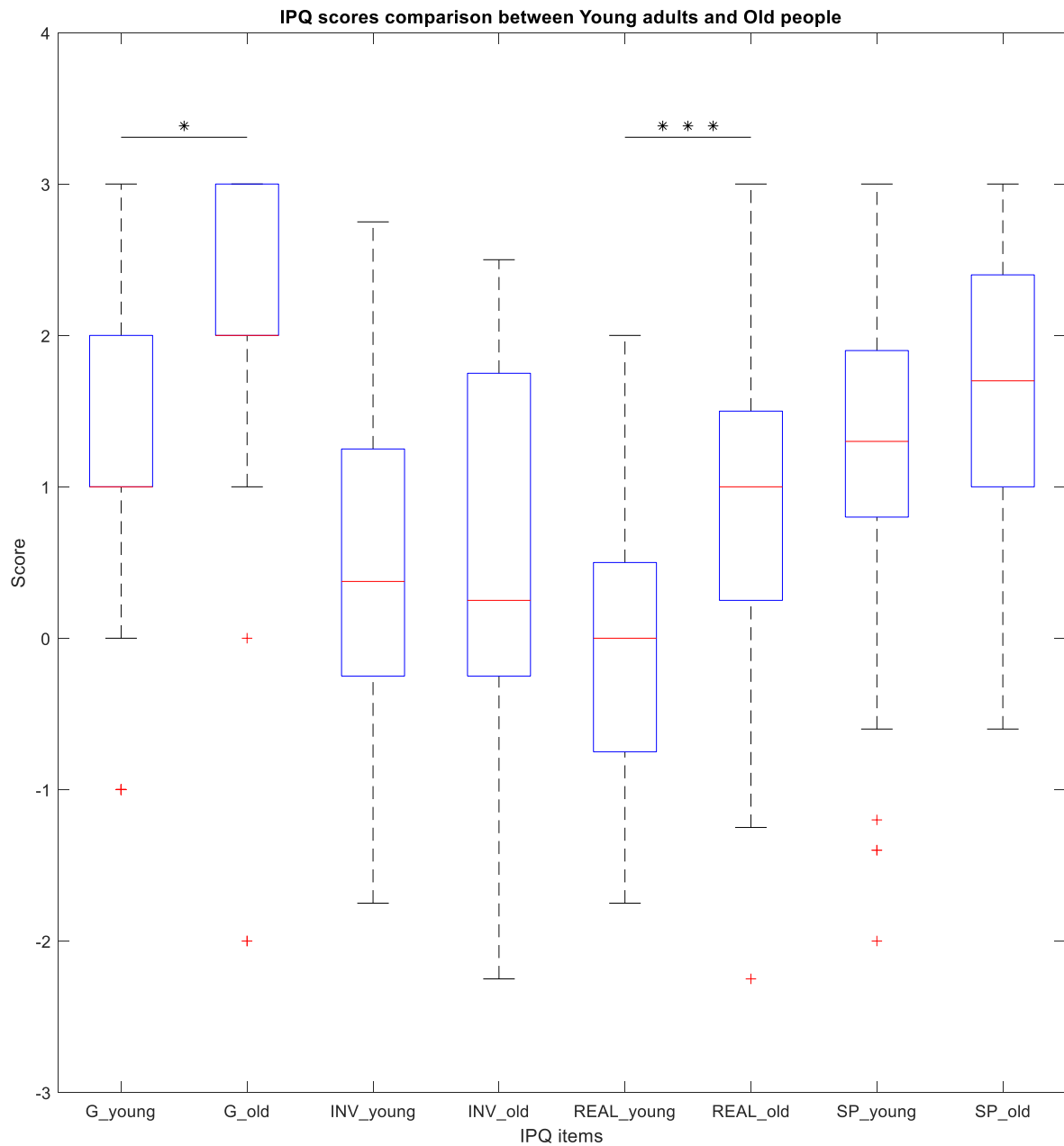


Figure 41 : Comparaison des scores item par item entre jeunes adultes et personnes âgées. * $p < 0.050$; *** $p < 0.001$.

On retrouve des augmentations significatives sur les scores à l'IPQ pour les personnes âgées, concernant la question générale (G) avec $p < 0.05$ et concernant l'item réalisme (REAL) avec $p < 0.001$. En revanche, il n'y a pas de différences significatives entre les deux populations concernant les items d'implication et de présence spatiale (INV : $p = 0.521$; SP : $p = 0.123$) (Figure 41).

Nous avons calculé un score global en additionnant l'ensemble des résultats de chaque question (à l'exception de la question générale) pour chacun de nos participants. L'exclusion de la question générale sur ce score global permet d'obtenir une tendance fournie par les items entre eux et non influencée par cette question liée directement au sentiment de présence de manière générale. Ce score global de présence peut s'étendre de -39 (faible sentiment de présence) à +39 (fort sentiment de présence). On mesure alors une augmentation significative des scores totaux médians pour les personnes âgées avec $p < 0.05$ (Figure 42).

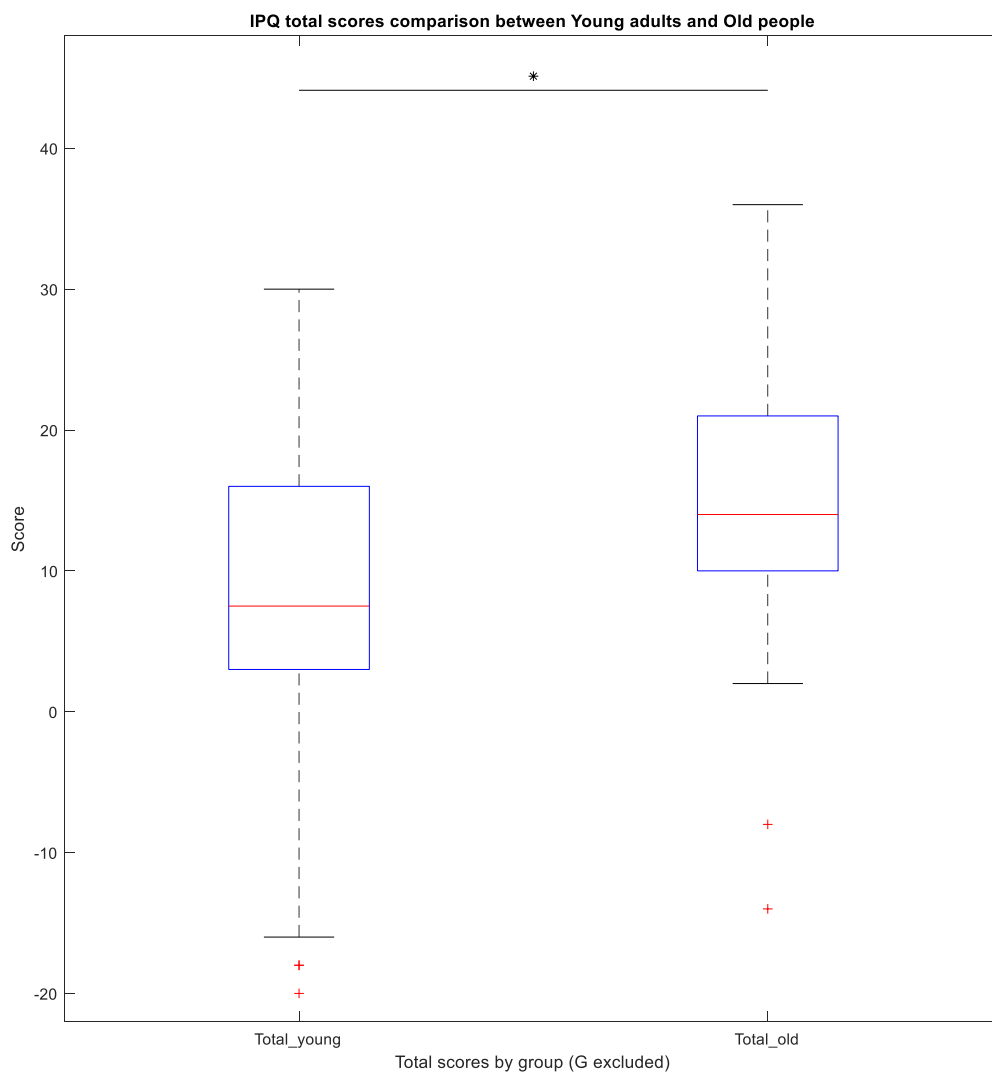


Figure 42 : Comparaison des scores totaux médians obtenus au questionnaire IPQ par les jeunes adultes et les personnes âgées, la question générale est exclue. $*p < 0.05$.

5.5.4. Discussion

Cette étude était destinée à mettre en évidence un éventuel effet d'âge ou effet générationnel sur le sentiment de présence perçu dans une expérience virtuelle immersive.

Concernant les scores, sur leur échelle s'étendant de -3 à +3, on remarque que l'implication (INV) est proche de 0, soit environ la moyenne, chez nos deux populations. L'implication reflète l'attention dédiée à l'environnement virtuel plutôt qu'à l'environnement réel. A ce titre, l'isolement visuel procuré par les visiocasques favorise effectivement l'orientation des ressources attentionnelles vers l'environnement virtuel. Toutefois, la vision n'est qu'un seul des nombreux sens qui favorisent l'implication. Or il est fort possible que certains distracteurs provenant de l'environnement réel aient nuit à l'expérience. En effet, les participants étaient assis sur leur chaise avant le lancement du test, visiocasque en place, et les expérimentateurs communiquaient les consignes oralement, générant ainsi une incohérence entre l'environnement virtuel visuel exempt d'avatar susceptible de communiquer oralement et les voix entendues. De plus, lors du test, afin d'assurer la sécurité des participants, une personne gérait le câble du casque en restant à proximité des participants pour également prévenir tout risque de chute. Cette présence extérieure, si elle était perçue, était en incohérence avec l'environnement virtuel. Si on ajoute à cela les sensations de la chaise qui ne ressemble peut-être pas suffisamment à un siège de train ne serait-ce qu'en terme de format et de confort, on peut alors considérer que l'environnement réel se rappelait à nos participants trop souvent et de bien des manières pour que cela ne permette une implication accrue. Il est tout à fait probable également que la scène virtuelle et la tâche ne demandaient que peu d'attention comparativement aux niveaux d'attention maximums de chaque utilisateur, impliquant que les ressources dédiées à la scène virtuelle puissent être facilement limitées à un faible niveau.

Concernant le réalisme de l'expérience virtuelle, on remarque une différence significative, les jeunes adultes auront tendance à trouver une même scène virtuelle moins réaliste que nos aînés. Au risque de tomber dans certains clichés faciles, il n'est tout de même pas à exclure que les plus jeunes, n'ayant grandi qu'avec les technologies les plus récentes, soient plus habitués à ce que ces technologies sont capables de produire comparativement à des personnes plus âgées qui auraient éventuellement laissé de côté la veille technologique et dont les références seraient plus anciennes. Ce serait alors les plus jeunes qui bénéficieraient d'une expérience plus actuelle, tout du moins dans l'ère numérique dans laquelle nous vivons. Les jeux vidéo, les effets spéciaux et surtout la qualité avec laquelle ils sont réalisés aujourd'hui aura pu creuser un fossé générationnel entre les aînés et les jeunes adultes que nous avons évalués.

La présence spatiale est le second item ne présentant pas de différence significative entre nos deux populations. La scène virtuelle représente une zone dans laquelle on peut simplement marcher puis retourner s'asseoir. L'interaction avec cet environnement se limite donc à un déplacement dont la retranscription est somme toute de bonne qualité. Ainsi, la visualisation à 360° avec un cadre interactif limité aura certainement limité les différences qui auraient été dues à l'âge. Il pourrait être intéressant de proposer, par exemple, une ou plusieurs tâches qui nécessiteraient « d'agir » de manière plus prononcée sur l'environnement virtuel. L'utilisation de manettes et donc de métaphores [184] pour l'interaction avec l'environnement pourrait peut-être montrer des différences. Les plus jeunes, rompus à l'exercice d'interagir à l'aide de boutons seraient peut-être moins perturbés que les personnes âgées qui, elles, trouveraient plus intuitif de manipuler un objet naturellement. Schubert explique observer régulièrement que les personnes néophytes vis-à-vis de la technologie et des logiciels doivent apprendre comment leurs actions changent les images affichées dans le visiocasque et comment en tirer de l'information qui a du sens. Cet apprentissage, tant qu'il n'est pas suffisamment abouti, nuitrait alors au sentiment de présence [225, 269]. Philippe Fuchs, lui, évoque notamment l'utilisation de schèmes lorsqu'il propose un chariot réel en guise d'interface comportementale pour une simulation de magasin. Il sera dès lors plus naturel de faire appel aux automatismes acquis lors de ses expériences dans un magasin réel pour les exploiter dans la scène virtuelle [180]. Une autre piste à explorer concernant la présence spatiale serait d'ajouter une représentation du corps de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Une étude publiée en 2018 [270] montre notamment que le sentiment de présence est favorisé par la qualité de représentation de l'avatar. Cette étude utilise différentes modélisations plus ou moins détaillées de l'utilisateur qui se voit dans un miroir virtuel. Une représentation détaillée de « l'incarnation » ou « embodiment » renforcerait le sentiment de présence [224, 271, 272, 273]. Une nouvelle étape serait d'intégrer un avatar représentant visuellement, à la première personne cette fois, les mouvements de l'utilisateur en temps réel afin qu'il puisse bénéficier de retours visuels plus aboutis lors de ses actions.

La question générale, demandant textuellement : « Dans le monde généré par l'ordinateur, j'ai eu le sentiment "d'y être" » montre que les personnes âgées ont eu plus le sentiment « d'y être » que les jeunes adultes. À elle seule, cette question donne la tendance générale du questionnaire qui est confirmée par le score global calculé avec la somme des scores des 13 autres questions : Les personnes âgées se sentent plus présentes dans l'environnement virtuel que les jeunes adultes. De plus, on observe une plus grande variabilité de ce score global chez les jeunes adultes que chez les personnes âgées. Si on considère l'échelle proposée par le

questionnaire IPQ comme une échelle dont les limites s'ajustent en permanence aux niveaux de présence les plus et les moins élevés qu'on puisse générer, tout en considérant que cette échelle est subjective et donc aussi dépendante de l'expérience personnelle de chaque individu, alors ces résultats offrent deux perspectives. Par exemple, il est possible que le sentiment de présence s'élève plus facilement chez les personnes âgées que chez de jeunes adultes comme ce que nous avons qualifié d'effet « wouahou » ou effet de surprise dans l'étude #1 [227]. Ceci suppose qu'une même scène pourra être utilisée plus longtemps (sous-entendu « sera obsolète plus tardivement ») avec des personnes âgées en proposant un niveau de présence suffisant contrairement à une scène qui serait utilisée avec des populations plus jeunes. Toutefois, cette perspective est à nuancer ; si le niveau de présence ressenti est dépendant de l'expérience de chacun en réalité virtuelle, proposer aux personnes âgées de nouvelles expériences virtuelles dans le cadre d'autres évaluations, de réadaptation ou simplement de loisir, pourrait diminuer leur niveau de présence dans une expérience virtuelle particulière si celle-ci propose une prestation de moins bonne qualité. Ainsi, il pourrait être intéressant dans de futures études d'essayer de discriminer la part objective (qui relève plutôt de l'immersion) de la part subjective (qui relève plutôt de l'état psychologique). Slater en 1999 propose une analogie avec la couleur d'un objet qui peut être décrite « objectivement » par une longueur d'onde, ce qui équivaldrait à l'immersion, et la perception voire l'émotion que procure cette couleur équivaldrait à la présence [179, 182, 223, 224, 274].

VI. Discussion générale

Les quatre études menées ont montré que l'utilisation d'un dispositif de réalité virtuelle avait une influence significative sur le comportement moteur à l'exécution d'une tâche relativement simple telle que le Timed Up and Go. On observe ainsi une augmentation du temps et du nombre de pas nécessaires pour effectuer la tâche en réalité virtuelle. Cet effet semble indépendant de l'âge puisqu'il affecte les personnes âgées comme les jeunes adultes. Il ne semble pas non plus dépendre du genre dans la globalité de la tâche. La simulation visuelle et sonore d'un mouvement cohérent ne semble pas perturber davantage la motricité puisque parmi les indices sensoriels disponibles, la majeure partie permet d'assurer un maintien efficace de l'équilibre. Un plus haut niveau de sentiment de présence, semble corrélé à une augmentation du temps en réalité virtuelle. Cependant, il semble que le sentiment de présence dépende de l'âge pour une expérience virtuelle équivalente, les jeunes adultes se sentant moins présents que les plus âgés.

Avec l'environnement que nous avons employé (un train virtuel) nous souhaitons proposer une scène modulable et évolutive. Cette ambition de modularité a contraint à des choix qui se posent comme limites des études. On peut notamment parler du couloir qui se rétrécit par la présence du bar dans le wagon, du fait également de devoir longer la paroi du wagon dans un sens puis dans l'autre au retour ou encore du sens de marche du train. D'un point de vue purement scientifique, tout cela va limiter la pertinence des comparaisons. De plus, le train simulé comme en mouvement ne l'est qu'avec les interfaces visuelle et sonore or, comme expliqué pour l'immersion et la présence, il va manquer des interfaces pour rendre la simulation plus réaliste. En l'absence de mouvements, vibrations etc. il est difficile d'affirmer être pleinement réaliste mais la cohérence d'un train roulant, de prime abord, paraît plus importante que dans une expérience égocentrée dont le mouvement perceptible visuellement est produit sans logique particulière. Il ne faut pas perdre de vue que la situation proposée en étude #2 et #3 avait plutôt pour objectif de fournir un environnement virtuel cohérent en mouvement, contrairement aux applications plutôt dédiées aux kinésithérapeutes vestibulaires qui s'attachent intentionnellement à perturber les entrées sensorielles en fournissant des informations incohérentes notamment entre œil et vestibule.

Nous avons pu tester deux populations dans une même expérience virtuelle et à la suite de nos observations, il pourrait être intéressant de se pencher de manière dissociée sur le matériel de réalité virtuelle et sur l'environnement numérique. Nous serions susceptibles de

remarquer des différences entre les visiocasques commercialisés ainsi que dans la variété des systèmes de fixation qu'ils proposent. Ces différences concerneraient en premier lieu les problématiques de masse (déséquilibrée/excentrée) sur la mobilité de la tête et les contraintes mécaniques au niveau de la nuque. Elles permettraient aussi une comparaison plus technique notamment au niveau des différents champs de vision et résolutions d'écran qu'ils proposent. Une telle exploration nécessiterait d'avoir un panel de visiocasques variés et éventuellement de différentes générations pour attester d'une évolution au niveau du confort et de l'ergonomie. Pour qu'ils soient comparés objectivement, il faudrait bien évidemment les comparer avec une seule et même scène en réalité virtuelle. Méthodologiquement parlant, une contrainte d'apprentissage pourrait apparaître consécutivement à l'essai de plusieurs visiocasques par un même échantillon d'utilisateurs. Pour mettre à l'épreuve l'environnement numérique, il faudrait employer une méthodologie inverse, utilisant un seul et même visiocasque pour éprouver plusieurs environnements. De telles dissociations hardware/software pondéreraient les effets de chacun de ces deux éléments ; toutefois, il ne faut pas perdre de vue qu'une expérience en réalité virtuelle sera toujours vécue comme un tout indissociable composé à la fois du matériel et du monde numérique.

Nous avons observé l'effet d'un dispositif complet de réalité virtuelle immersive sur des paramètres de marche au sens large. Il serait évidemment intéressant d'approfondir sur d'autres paramètres de la marche tels que ceux déjà évoqués comme la largeur de pas puisque'une augmentation de celle-ci permet d'élargir le polygone de sustentation et donc de sécuriser l'équilibre dynamique, ou encore l'ensemble des paramètres mesurés lors d'une analyse quantifiée de la marche.

Au-delà des aspects locomoteurs, un monde virtuel interactif mettrait également à l'épreuve les participants sur d'autres tâches qui nécessiteraient, en plus des déplacements, des interactions avec les membres supérieurs comme la manipulation, la saisie d'objets virtuels etc. Il existe par exemple des applications de dessin en 3D, on pourrait envisager d'évaluer les stratégies posturales pour réaliser une figure ou la reproduction d'un modèle nécessitant des changements de positions et d'orientation. Une augmentation progressive de la difficulté serait possible en augmentant, par exemple, le volume de la figure. Le participant devrait atteindre des zones de plus en plus éloignées (en haut ou en bas) l'obligeant à se baisser ou à monter sur la pointe des pieds. Concernant la manipulation d'objets, la réalité virtuelle, aujourd'hui, est quelque peu limitée et n'apporterait certainement pas d'avantages concernant la manipulation d'objets lourds, aux formes complexes ou aux textures et consistances variées, pour lesquelles une manipulation hors environnement virtuel serait préférable.

La réalité virtuelle est aujourd'hui très intéressante pour proposer une méthode d'évaluation à la fois modulable (numériquement) et reproductible du comportement moteur des participants dans un environnement maîtrisé. Les conclusions de la première étude (Etude #1), affirmant notamment que les personnes les plus à risque de chute (temps plus élevé au Timed Up and Go) sont plus susceptibles d'être affectées lors de l'utilisation de réalité virtuelle immersive, nous amène à envisager la réalité virtuelle comme un outil de réadaptation. On peut imaginer que les activités virtuelles, permettant entre autres du déplacement, peuvent servir de moyen d'apprentissage pour faire face à un plus large éventail de contraintes environnementales. Ces activités pourraient aussi bénéficier, comme la réalité virtuelle non immersive en son temps (ex : activités jeux Wii dans les EHPADs), du caractère ludique favorisant l'adhésion et le plaisir de pratiquer ou encore l'aspect compétition.

L'évaluation du sentiment de présence offre deux données importantes, à savoir qu'il est positivement corrélé à une modification des paramètres spatio-temporels de la locomotion lors d'une tâche mais aussi il donne un état daté et personnalisé de l'expérience virtuelle proposée. En effet, le sentiment de présence est aussi dépendant de l'expérience virtuelle précédente et de l'habitué. Ainsi, des personnes ayant déjà une expérience ou au moins une connaissance de ce que peut apporter la technologie à la simulation, seront moins impactées ou impressionnées que des personnes découvrant le potentiel jusqu'alors insoupçonné de cette technologie. Il semble que l'âge puisse être un facteur pouvant différencier ces deux catégories de personnes. Peut-être est-il possible de considérer le questionnaire sur le sentiment de présence comme une échelle sans limite haute ou basse, évoluant au gré des technologies et des nouvelles expériences sensori-motrices que nous sommes capables de proposer. Comme le monde vidéoludique a pu en faire l'expérience au fil des évolutions comme par exemple le passage de la 2D à la 3D, le sentiment de présence est susceptible d'évoluer avec le temps. Nous pouvons parfaitement imaginer de réutiliser cette scène virtuelle dans ce même visiocasque HTC Vive avec une nouvelle cohorte de personnes âgées et évaluer le sentiment de présence dans 10, 15 ou 20 ans. Le bilan sur le sentiment de présence reflétera probablement l'obsolescence du tout (hardware/software) par rapport aux dernières expériences virtuelles connues par cette cohorte. Cette variation du sentiment de présence pourrait alors devenir le « témoin d'usure » de l'expérience virtuelle et attester de la nécessité de la faire évoluer ou de la remplacer.

A plus long terme, la réalité virtuelle est susceptible d'être remplacée par la réalité mixte qui permet la superposition « intelligente » d'éléments virtuels sur l'environnement réel. Ce type de dispositifs, lorsqu'il sera suffisamment mature, permettra d'ajouter les mêmes contraintes contrôlées mais à un environnement réel et non modélisé numériquement cette fois.

Ceci pourra renforcer le caractère « réaliste » des stimulations que nous avons souhaité proposer ici par l'intermédiaire de la réalité virtuelle. Des limites liées à l'isolement de l'individu du monde extérieur lorsqu'il est équipé de réalité virtuelle pourraient être balayées d'un revers de la main avec des systèmes de réalité mixte autonomes. La réalité mixte pourrait évidemment servir à l'évaluation du comportement moteur comme nous avons souhaité le faire dans ces études, à la réadaptation en stimulant les utilisateurs dans la suite logique de ce qui a déjà été proposé dans les établissements spécialisés, mais aussi aider les personnes vulnérables dans leur quotidien en leur apportant notamment des informations qu'elles n'auraient pas recueillies elles-mêmes. Par exemple, une personne âgée avec des troubles sensoriels prononcés (vue, audition...) qui souhaiterait traverser une rue, si elle n'a pas été capable de recueillir toutes les informations nécessaires pour le faire en toute sécurité, un système de réalité mixte, couplé à un système d'analyse de l'environnement spécialement programmé, pourrait l'avertir directement d'un danger imminent. L'analyse de l'environnement proposé par ces systèmes utilisant plusieurs types de capteurs pourrait retranscrire par exemple la topographie d'un terrain pour le cas où elle serait difficilement identifiable visuellement. Les usages de telles technologies sont nombreux et l'assistance pour la prévention du risque de chute pourrait être l'un d'entre eux.

Des perspectives ont découlé des limites exposées précédemment pour clarifier certaines zones d'ombres en lien avec les études menées ici, mais il existe d'autres projets en cours utilisant à la fois de la réalité virtuelle et de la métrologie humaine.

VII. Perspectives : Evaluer le risque de chute en réalité virtuelle.

7.1. MéMoSim'S TUG Simulator XX

7.1.1. Contexte

Les expériences virtuelles que nous avons utilisées pour mener à bien les quatre études pourraient bénéficier d'améliorations. Voici comment la base du logiciel a été pensée :

Pour la conception du scénario en réalité virtuelle utilisé à l'occasion de nos campagnes de mesure, nous avons collaboré avec des étudiants ingénieurs recrutés pour leur Projet Interdisciplinaire De Recherche ainsi que leur stage de 3^{ème} année. Ils avaient pour projet de s'intéresser au risque de chute et aux tests généralement pratiqués pour les retranscrire sous la forme d'un environnement virtuel. Après analyse de la littérature, c'est le test Timed Up and Go qui a été choisi. Voici quelques explications concernant ce choix :

- Faisabilité : Le TUG consiste en une seule et unique tâche dans un espace limité s'inscrivant aisément dans la surface exploitable en réalité virtuelle et proposant en plus de la locomotion des actions plus complexes telles qu'un lever de chaise, un demi-tour et enfin une assise.
- Plurimodal : Dans la littérature, le TUG a également bénéficié de plusieurs variantes qui permettent de le complexifier comme par exemple l'ajout d'une double tâche, motrice ou cognitive.

Réalisme et polyvalence, voici les maîtres mots qui ont guidé la conception de l'environnement. Si l'environnement de base doit permettre de réaliser un test Timed Up and Go, il doit pouvoir être enrichi et proposer d'autres modalités de test. C'est pourquoi il a été choisi de le modéliser dans un train. Un tel environnement peut en effet être mis dans plusieurs configurations tout à fait sensées, susceptibles de sensibiliser le test à une population spécifique. L'environnement virtuel prend d'abord la forme d'un hall de gare dans lequel le participant est assis et a le loisir d'explorer son environnement virtuel visuel à 360° pour se familiariser avec le port du visiocasque et effectuer quelques ajustements (réglage du système de fixation, positionnement, réglage de la distance inter pupillaire). Ce hall de gare présente un environnement proche dans lequel se trouve un écran montrant le test et un environnement plus éloigné, permettant d'ajuster au mieux pour que tout l'environnement soit correctement visible. Le participant, assis sur sa chaise avec accoudoirs est ensuite immergé dans un train virtuel. Il est à l'intérieur d'un wagon bar et la chaise virtuelle du hall de gare est remplacée par un fauteuil

classique de train. Le choix de modéliser un wagon bar plutôt qu'un wagon de passager se justifie par la nécessité d'avoir un espace suffisant pour réaliser un Timed Up and Go et aussi pour éviter un effet couloir exiguë trop prononcé comme on l'aurait entre deux rangées de sièges. Devant le siège, à 3 mètres, se trouve une valise devant laquelle les participants devront faire demi-tour puis retourner s'asseoir. L'intérêt d'utiliser un obstacle volumineux se justifie par le champ de vision réduit des visiocasques, une marque au sol obligerait les participants à pencher exagérément la tête pour la visualiser lorsqu'ils en sont proches. La chaise physique sur laquelle le participant est assis puis doit se rasseoir est placée au même endroit que la chaise du hall de gare et le siège du train. Elle est également maintenue en place pour éviter un quelconque accident.

Pour bénéficier de la polyvalence permise par un environnement « train », différentes conditions ont été imaginées pour la réalisation d'un Timed Up and Go : le train arrêté en gare, le train en marche à vitesse constante, le passage du train dans un tunnel ou encore un Timed Up and Go nécessitant le passage d'un wagon à un autre.

Description détaillée des conditions :

- Train à l'arrêt (en gare)

Le train est arrêté sur sa voie en gare, l'environnement est donc immobile, parfaitement éclairé et silencieux.

- Train en marche

Le train circule sur sa voie à une vitesse constante, ce qui se traduit par un défilement du paysage visible au travers des vitres de part et d'autre du wagon, des poteaux défilent de manière régulière et l'environnement sonore simule celui d'un train roulant. Le son n'est pas spatialisé.

- Passage dans un tunnel

Le train circule sur sa voie à vitesse constante, le paysage est visible et le wagon parfaitement éclairé et le son simule le train en marche. Le passage dans le tunnel s'effectue durant le Timed Up and Go et se traduit par l'obscurcissement soudain du wagon qui diminue partiellement la visibilité et le son est alors légèrement amplifié (réverbération). Après une courte période, le train sort du tunnel avec l'effet inverse.

- Passage d'un wagon à l'autre

Imaginé comme potentiellement perturbant pour des personnes atteintes de la maladie de Parkinson avec un Freezing of Gait, le trajet pour le Timed Up and Go est parsemé d'éléments pouvant déclencher un Freezing of Gait, à savoir l'initiation de la marche (qui suit le lever de chaise), un passage étroit avec une porte automatique qui s'ouvre à

l'approche de la personne, un demi-tour à trois mètres, une nouvelle initialisation de la marche, un nouveau passage étroit et enfin un nouveau demi-tour pour s'asseoir.

On peut aussi ajouter à chacune de ces conditions une deuxième tâche (cognitive) telle que du calcul mental, exemple : soustraction de 7 en 7 à partir de 100.

L'utilisation de ces *scenarii* à l'occasion de nos études a constitué un traitement vidéo colossal et laborieux. Si l'ambition était de déployer un tel système dans un cadre médical, il serait absolument impossible au personnel soignant d'effectuer une analyse vidéo des essais réalisés par leur patient. Le temps qui doit être consacré à ces tâches rébarbatives a conduit à réfléchir sur le potentiel offert par le matériel de réalité virtuelle quant à l'automatisation d'un certain nombre de tâches. Nous avons alors souhaité paramétrer le logiciel pour la détection des phases du Timed Up and Go et ainsi gagner du temps et éventuellement en précision pour le chronométrage et le compte du nombre de pas.

7.1.2. Pistes pour l'automatisation de métriques : **Chronométrage**

Ce train virtuel ayant été développé pour un casque HTC Vive de première génération au départ, il utilise un tracking externe permettant de connaître en tout temps la localisation et l'orientation du casque dans l'espace. C'est bien entendu cette localisation et cette orientation qui permettent d'obtenir un affichage cohérent de la scène virtuelle en fonction des mouvements et déplacements de l'utilisateur. La qualité de tracking nécessaire pour afficher un environnement cohérent avec les mouvements de l'utilisateur peut être exploitée pour une reconnaissance automatique de la phase en cours lors du Timed Up and Go. Le principe de fonctionnement d'une telle automatisation repose sur l'orientation et la localisation du casque entre les deux balises. Des pistes de développement ont été exploitées mais nécessiteraient encore quelques ajustements. Ce qui a été produit fonctionne de la manière suivante :

La taille des utilisateurs pouvant varier, un Timed Up and Go servant de calibration va être nécessaire pour connaître des positions qui serviront de référence. Ainsi, l'utilisateur doit être correctement assis sur la chaise avant le départ, dos contre le dossier, une première position est relevée. Cette position, qui est à la fois la position de départ et d'arrivée, servira de référence pour le démarrage et l'arrêt du chronométrage, dès qu'on s'éloigne de cette position puis quand on y revient. Ensuite, il doit être possible de découper le Timed Up and Go en différentes phases : se lever, aller, demi-tour, retour, s'asseoir.

Se lever :

Pour cette phase, la calibration va prendre en compte la hauteur de l'utilisateur lorsqu'il est debout, ainsi, le temps pour la phase se lever est compris entre le départ, quand la tête se déplace depuis la position de référence (assis) jusqu'à la posture érigée avec le casque à la hauteur calibrée par rapport à l'axe vertical.

Aller :

Pour la phase *aller*, qui démarre sitôt la phase *se lever* achevée, elle sera achevée lorsque l'utilisateur aura parcouru la distance exigée.

Demi-tour :

Cette phase démarre à la fin de la précédente et s'achève lorsque le visiocasque a fait une rotation d'environ 180° autour de l'axe vertical.

Retour :

La fin de cette phase de marche est un peu plus complexe à délimiter car il peut y avoir deux paramètres à considérer selon la manière dont va être exécutée l'assise qui comprend aussi le demi-tour. Soit le demi-tour est totalement dissocié de l'assise, soit il est réalisé simultanément, auquel cas la hauteur du visiocasque va diminuer en même temps que son orientation va changer. La difficulté étant alors de définir précisément la phase suivante. Pour simplifier l'automatisation, a donc été décidé, comme pour la première phase de marche, de marcher 3m.

S'asseoir :

Pour cette tâche qu'est le Timed Up and Go, à la différence d'un test tel que le 5 assis-relevé de chaise, la personne aborde la chaise de front et doit se retourner pour s'asseoir. Il ne s'agit donc pas seulement d'abaisser le centre de gravité, il faut également orienter son corps. L'exécution de ces actions (pivoter et s'asseoir) de manière simultanée contraint à associer les deux actions. Cette phase est alors délimitée par la fin de la phase de *Retour* et le retour du casque en position initiale.

7.1.3. Pistes pour l'automatisation de métriques : **Trajectoires**

Le suivi du casque dans la zone d'exploration tout au long du TUG va aussi servir à analyser la trajectoire de la tête au cours du test. Ainsi, il est possible d'afficher la trajectoire de la tête sur tous les plans, mais ceux qui sont porteurs d'informations sont les plans : sagittal et horizontal (vue de droite et vue de dessus).

- Trajectoire dans le plan horizontal.

Vu du dessus, le déplacement du sujet sera comparé à une trajectoire dite « idéale » qui n'est autre que la ligne droite allant du siège à la valise. On observera le déplacement de la tête de l'utilisateur lors de la réalisation du TUG par rapport à cet axe imaginaire et en déduire plusieurs paramètres tels que l'écart maximal, l'aire entre la trajectoire et l'axe, avec ou sans prendre en compte une zone de confiance pour ce calcul. La zone de confiance est une surface autour de l'axe pour laquelle on ne considère pas qu'il s'agit d'un éloignement de la trajectoire, cette zone de confiance est paramétrable. L'analyse de cette trajectoire vue de dessus permet d'observer par exemple si une personne fait son demi-tour sur place ou si elle a plutôt tendance à décrire une ellipse, ce qui peut être le cas pour les personnes utilisant une aide à la marche (canne/canne anglaise), lors du demi-tour il se peut que la personne pivote autour de son aide à la marche. L'analyse de la trajectoire de la tête donne aussi une indication intéressante sur la manière de réaliser l'assise. Selon la manière dissociée ou simultanée, la trajectoire sera différente : En cas de demi-tour et d'assise dissociés, la trajectoire de la tête restera proche de l'axe puisque le demi-tour est réalisé en posture érigée devant la chaise, ensuite la personne s'assoit en restant globalement dans l'axe. Pour le cas d'une assise réalisée simultanément avec le demi-tour, l'abaissement du centre de gravité va induire le déplacement de la tête vers l'avant (par rapport au corps), cumulé au demi-tour, ce déplacement de la tête vers l'avant va se matérialiser sur la trajectoire par une boucle excentrée de l'axe. (Figure 43)

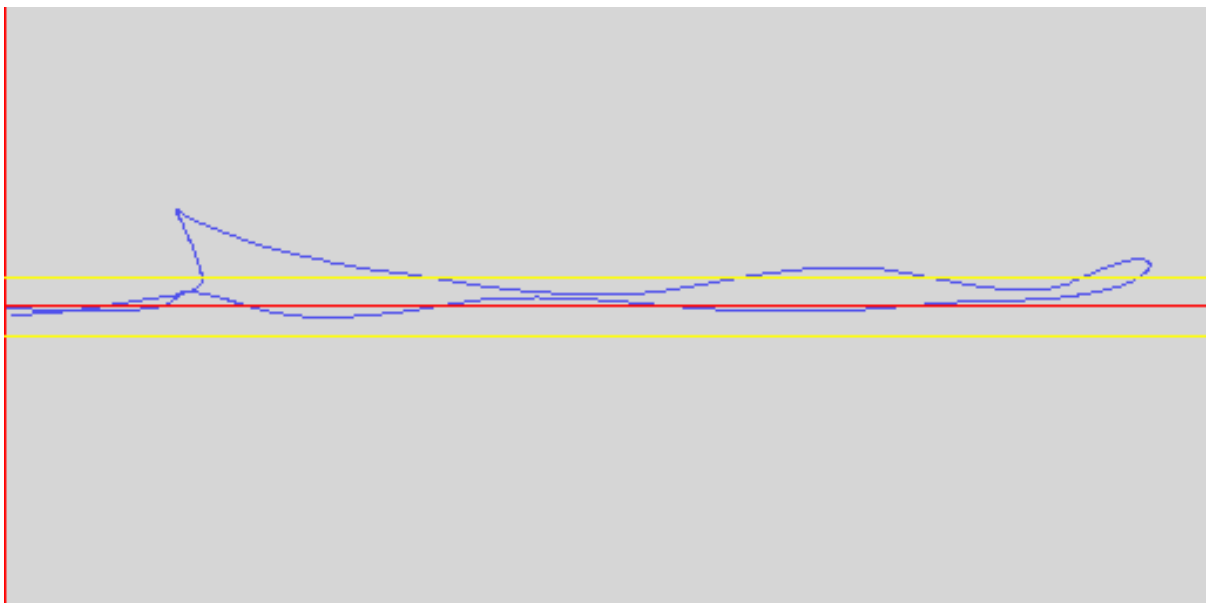


Figure 43 : Illustration de la trajectoire du visiocasque vue du dessus à la réalisation d'un Timed Up and Go dans le train virtuel. Axe rouge : trajectoire « idéale », axes jaunes : zone de confiance. Le départ et l'arrivée (chaise) se situent à gauche.

- Trajectoire dans le plan sagittal

En vue sagittale, l'analyse de la trajectoire de la tête renseigne sur plusieurs paramètres. On peut observer le déplacement de la tête vers l'avant lors du lever de chaise et y associer la projection du buste vers l'avant, ce qui donne des indications sur la prise d'élan nécessaire pour se lever. On peut aussi observer les oscillations verticales lors des phases de marche, une analyse automatique de ces oscillations pour compter le nombre de pas. L'observation en vue de dessus concernant la phase d'assise dissociée ou simultanée peut-être comparée à celle faite dans la vue sagittale puisqu'on peut remarquer une trajectoire proche de celle du relevé de chaise dans le cas de l'assise dissociée, et un abaissement de la tête plus précoce lors d'une assise simultanée. (Figure 44)

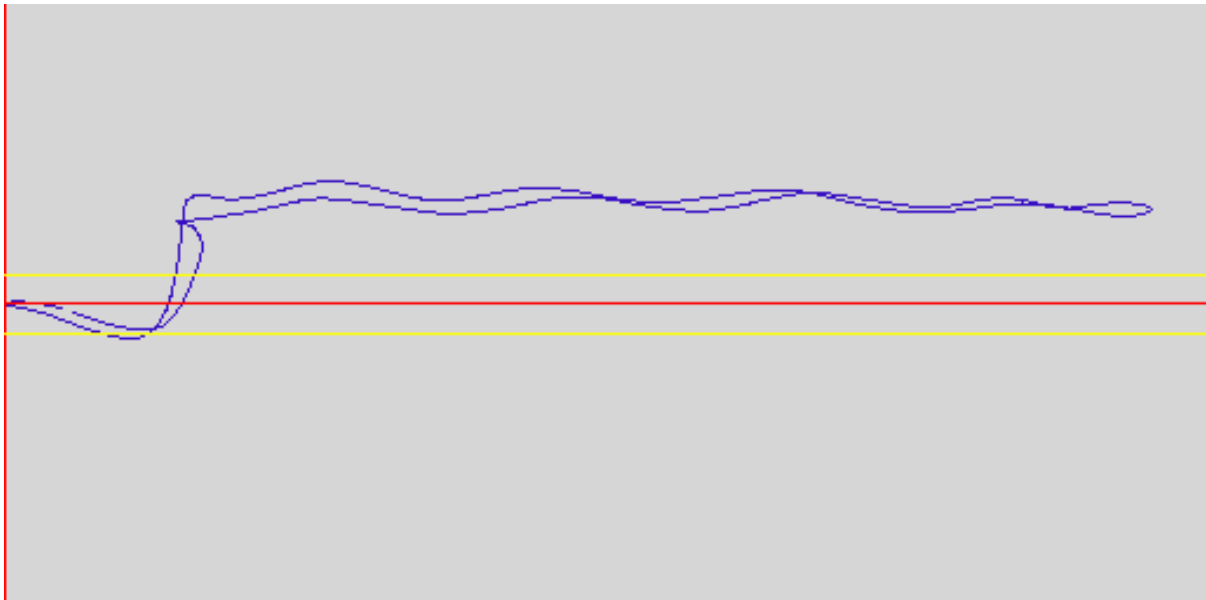


Figure 44 : Illustration de la trajectoire du visiocasque vue de droite à la réalisation d'un Timed Up and Go dans le train virtuel. Les axes n'apportent rien dans cette vue sagittale. Le départ et l'arrivée (chaise) se situent à gauche.

7.2. PrévSim

« Evaluer le risque de chute en réalité virtuelle », tel est l'objectif de l'étude PrévSim. Partant du postulat que la réalité virtuelle immersive permet de contextualiser un environnement et une tâche en bénéficiant de la standardisation et la reproductibilité des environnements numériques, l'intérêt d'une telle étude est de recueillir des données sur la motricité, la physiologie, l'attention visuelle et la psychologie. La compilation des données recueillies permettra alors la génération de modèles ou profils pour prédire si les individus sont « à risque de chute » ou « non à risque de chute ». Cette comparaison devrait également permettre de déterminer les origines et spécificités de ce risque de chute. La prédiction d'un risque de chute permettra une prévention efficace de ce risque en proposant une prise en charge adaptée.

7.2.1. Réflexion préliminaire

Le comportement moteur est basé sur les décisions d'action des individus. Au-delà des sur/sous estimations des capacités de l'individu, on peut généralement affirmer que la manière de réaliser un acte moteur dépend des capacités de la personne. Autrement dit, si une personne est à l'aise dans le fait de se lever, d'interagir avec un meuble en hauteur, de marcher sur un sol déformé etc. elle adaptera sa stratégie motrice à son niveau d'aisance. Partant de ce postulat, l'idée a été de développer deux scénarios susceptibles de démarquer les stratégies motrices d'une personne qui serait à risque de chute d'une personne qui ne l'est pas.

Nous avons alors proposé un cahier des charges pour différentes tâches en réalité virtuelle. L'objectif de tels scénarios est d'évaluer de manière objective les stratégies motrices utilisées par les participants pour réaliser les différentes tâches, contextualisées et porteuses de sens dans un environnement évoquant et simulant la vie courante.

7.2.2. Tâches

a) Tâches posturales

➤ Tâches proactives

Pour le développement de ce scénario en réalité virtuelle, l'inspiration provient d'un item du questionnaire sur la peur de chuter, le Fall Efficacy Scale de Tinetti [249] sur la quantification du niveau d'appréhension à la « préparation d'un repas simple ». Cette tâche peut demander de nombreux gestes et prises d'appuis différents susceptibles de faire ressortir des stratégies motrices différentes.

L'environnement virtuel a été conçu pour pouvoir fonctionner avec un visiocasque mais aussi un CAVE, l'espace est donc limité en surface ainsi qu'en orientation (à gauche, en face

et à droite). Il représente une cuisine avec un plan de travail au niveau médian et des meubles en bas et en haut. (Figure 45)



Figure 45 : Cuisine virtuelle conçue pour l'évaluation des stratégies motrices à l'utilisation des différents éléments.

Les déplacements se font en peu de pas et consistent principalement en des changements d'orientation et l'obligation de se baisser ou au contraire de se faire plus grand pour interagir avec les éléments les plus hauts.

Les tâches demandées sont porteuses de sens et de logique, l'objectif est qu'en demandant aux participants de faire à manger, ils agissent plus naturellement que lorsque la séquence d'actions motrices est abstraite et donnée au fur et à mesure. Il est donc demandé aux participants de faire la cuisine : mettre une marmite dans le four, de prendre une poêle pour la mettre à chauffer et d'allumer la hotte aspirante ; de mettre la table : prélever une assiette, un verre, une tasse et les disposer sur le plan de travail derrière ; faire la vaisselle : prendre une marmite et la mettre à tremper, prendre un récipient et le vider au-dessus de la poubelle.

Ces tâches requièrent d'interagir avec le mobilier et l'électroménager. Comme expliqué dans le chapitre sur la réalité virtuelle (paragraphe b), page 28), les utilisateurs doivent utiliser des métaphores par l'intermédiaire de manettes. Il s'agit donc de presser la gâchette pour saisir l'objet lorsque la manette est en contact avec et de relâcher la gâchette pour relâcher l'objet. Le mobilier a été conçu pour proposer plusieurs types de mouvements d'interaction. Les tiroirs nécessitent un mouvement linéaire, les placards un mouvement circulaire dans le plan

horizontal et le four un mouvement circulaire sur un plan vertical. La saisie d'un objet ne se fait qu'à une seule main, notamment à cause des raisons évoquées sur les collisions en l'absence d'objet physique. Cette particularité autorise les deux mains pour deux actions distinctes, exemple : ouvrir un placard/tiroir avec la main gauche, utiliser la main droite pour y prélever l'objet désiré. Sans imposer une telle interaction, les participants qui décideraient de procéder ainsi auraient peut-être un profil différent des autres en ce qui concerne le risque de chute.

➤ Tâches réactives

Un « jeu sérieux » a également fait l'objet d'un développement. Il propose à l'utilisateur de rattraper des ballons avec un panier tenu à une main avec une manette. Ces ballons sont lancés par un avatar dans une zone limitée autour de l'utilisateur.

Divers paramètres sont ajustables pour fournir de nombreux niveaux de difficultés. On peut régler la vitesse du ballon et la fréquence de lancer, moduler la distance du lanceur, faire varier la taille du panier, du ballon ou en modifier la couleur.

L'objectif pour l'utilisateur est de rattraper un maximum de ballons, l'intérêt pour les évaluateurs est de pouvoir effectuer des mesures sur le comportement moteur des utilisateurs en réaction au mouvement d'un ballon virtuel.

b) Tâches locomotrices

De nombreuses études concernent déjà la dangerosité de l'habitat en termes d'aménagement pour limiter les facteurs environnementaux du risque de chute et les innovations concernant les espaces urbains sont pour l'instant limitées. Elles concernent essentiellement les aménagements prévus pour les personnes à mobilité réduite et personnes en situation de handicap. Pour les personnes âgées autonomes, mais toutefois à risque de chute, l'environnement urbain peut se révéler être une source de nombreuses difficultés pour le maintien de l'équilibre. La difficulté que serait l'adaptation de toutes les infrastructures urbaines extérieures renvoie plutôt au besoin d'adapter les personnes à l'environnement et ses contraintes. C'est pourquoi nous avons envisagé une tâche locomotrice mobilisant des obstacles et de la double tâche.

L'environnement devant simuler l'extérieur devait avoir une zone d'exploration limitée à la fois par la pièce réelle dans laquelle est réalisé le test et les limites du système de visiocasque. Le visiocasque dont nous sommes équipés propose une surface de maximum 4 m par 4 m. Il a donc fallu envisager une tâche locomotrice courte dans un espace optimisé. Pour ce faire, nous avons envisagé la réalisation de cette tâche sur une terrasse de café. Le chemin à

emprunter contourne une table en position centrale et est parsemé d'obstacles. L'environnement est également pourvu d'un fond sonore. (Figure 46)



Figure 46 : Terrasse virtuelle conçue pour l'évaluation des stratégies motrices en locomotion dans un environnement contraint.

L'objectif de cette scène virtuelle est de faire parcourir la terrasse aux participants dans plusieurs conditions distinctes. La première est une marche simple, sans obstacles le long des lignes noires tracées au sol. A ce cheminement, pourront être ajoutés des obstacles immobiles, modélisés par un plateau de serveur posé au sol, une ardoise tombée et une branche d'arbre. Des obstacles mobiles sont également déclenchés par l'arrivée du participant dans une zone spécifique, ainsi, aléatoirement, une personne virtuelle, sur trois possibles, peut décider de se déplacer vers la table en coupant la route au participant. Enfin, il est aussi possible d'ajouter une personne virtuelle avec laquelle le participant discutera (format questions/réponses) pour avoir les conditions précédentes également en double tâche. (Figure 46)

Les obstacles immobiles ont été choisis en fonction de leur mode franchissement. Le plateau de serveur, obstacle rasant, doit être enjambé plutôt en longueur. L'ardoise tombée au sol, quant à elle, nécessite un franchissement en hauteur obligeant les participants à lever les genoux/pieds. Sa hauteur est équivalente à la première marche d'un bus par rapport à la route. La branche d'arbre, dont la hauteur varie, s'ajuste à environ 85% de la taille des participants,

portant l'obstacle aux environs de la hauteur des épaules. Les participants doivent ainsi se baisser pour passer sous l'obstacle.

7.2.3. Mesure objective

Pour proposer une analyse relativement complète du comportement humain, des outils de mesure ont été choisis pour donner des informations sur la cinématique, la cinétique, la physiologie, l'attention visuelle et la psychologie.

a) Cinématique

Une évaluation de la cinématique du corps complet des participants est proposée. Elle est permise par l'utilisation de centrales inertielles qui mesurent les variations angulaires des segments corporels sur lesquels elles sont placées. Elles sont composées d'un accéléromètre, d'un gyroscope et d'un magnétomètre pour capter les changements d'angulation par rapport à une position initiale de référence. Les données transmises par ces capteurs, associés à un avatar, sont sous la forme de quaternions qui évitent le blocage de cardan comparativement aux angles d'Euler. L'objectif de cet outil est double, le premier est de pouvoir combler l'isolement du visiocasque en animant un avatar reproduisant en temps réel les mouvements du participant. Le second est d'obtenir des indicateurs tels que les accélérations, vitesses et angulations articulaires.

b) Cinétique

La cinétique est mesurée grâce à des semelles de pression glissées dans les chaussures. Les semelles de pression sont des nappes constituées de deux fines couches de plastique entre lesquelles sont appliqués des matériaux conducteurs et un matériau sensible à la pression et réparti selon un quadrillage. Chaque intersection de ce quadrillage va alors devenir un point dont la résistance va changer en fonction de la pression qui lui est appliquée, ainsi, ce changement de résistance va être transmis au processeur qui va transformer ce changement de résistance en information de pression en la comparant à une matrice de calibration. Des semelles de pression permettent ainsi d'obtenir des données sur les pressions exercées sous chaque pied ainsi que la répartition de ces pressions sous les différentes zones du pied.

c) Physiologie

La physiologie est évaluée par l'intermédiaire des données de fréquence cardiaque à l'aide d'électrodes de surface qui captent l'activité électrique du cœur à chaque activation, de

données de fréquence respiratoire avec un bandeau thoracique sensible à l'étirement et des données de conductance électrodermale (GSR - Galvanic Skin Response) mesurant l'activité des glandes de sudation et le système nerveux autonome (involontaire). Ces données de physiologie ont pour objectif d'évaluer et de dissocier les réponses dues à un effort physique pour la réalisation d'une tâche ou au caractère « stressant » de la tâche en question.

d) Attention visuelle

Le visiocasque utilisé est équipé d'un Eye-tracking, dispositif fonctionnant par infrarouge et mesurant les variations d'orientation des yeux localiser le regard de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Les données fournies par un tel dispositif évaluent notamment la pertinence des stratégies visuelles de prise d'information. C'est notamment utilisé dans le sport, dans l'armée et dans la publicité.

e) Psychologie

L'évaluation de paramètres psychologiques est réalisée avec l'utilisation d'auto-questionnaires sur la peur de chuter [249, 250] et sur les stratégies de coping [275] dans leurs versions traduites en français. En effet, il est important de connaître le niveau de confiance des personnes à risque de chute en leur équilibre pour la réalisation de tâches spécifiques ainsi que leurs stratégies d'adaptation face à une situation problématique.

f) Recensement des chutes

Les données recueillies avec les différents outils de mesure doivent être comparées au nombre de chutes qui auront eu lieu dans l'année (12 mois) qui suit. Trimestriellement, chaque participant doit renvoyer un formulaire de recensement des chutes, relatant les conditions et les conséquences de la chute à plus ou moins long terme.

7.2.4. Objectifs sur les traitements de données

Les travaux menés sur le développement de cette méthode d'évaluation du risque de chute doivent aboutir vers un traitement statistique particulier utilisant les algorithmes d'apprentissage, également appelés « Machine Learning ». Cet apprentissage, souvent qualifié « d'intelligence artificielle » par abus de langage, sera mis en place avec une approche supervisée probabiliste.

L'apprentissage supervisé probabiliste utilise toutes les données d'entrée que sont les paramètres cinématiques, cinétiques, physiologiques, psychologiques et d'attention visuelle

enregistrés pour les associer à une donnée de sortie, à savoir le nombre de chutes dans l'année qui suit le protocole de mesure. Une approche non supervisée créerait elle-même différentes classes, la difficulté étant alors de déceler quels facteurs différencient ces classes et ces facteurs pourraient ne pas être en lien avec le risque de chute. Enfin, le caractère probabiliste donne un niveau d'appartenance à chaque classe (non à risque, risque modéré, risque élevé).

Pour envisager un protocole de mesure plus léger du point de vue matériel et de l'équipement des participants, un second objectif serait d'extraire de toutes les mesures effectuées, les paramètres les plus discriminants du risque de chute. Pour ce faire, les données d'entrée et de sortie subiront une analyse par composante principale. Cette analyse dissocie deux paramètres corrélés avec une évolution similaire, de sorte qu'un seul des deux ne mériterait finalement d'être mesuré. A l'inverse, le risque de chute pourrait simplement ne pas ou peu dépendre de certains des paramètres évalués. Ainsi, on pourrait réduire le champ de mesure aux paramètres les plus représentatifs.

7.2.5. Développements logiciels

Une thématique de recherche avec des objectifs aussi ambitieux nécessite de nombreux développements afin de répondre autant que possible au cahier des charges. Les développements concernent d'abord les scènes en réalité virtuelle avec l'automatisation de la détection notamment de certaines tâches/interactions. Il faut modéliser les environnements, les modifier, les adapter aux différentes tâches. En parallèle, il faut développer toute la partie acquisition de données provenant de plusieurs sources matérielles et logicielles. L'application ainsi créée devra être capable d'associer les données notamment cinématiques, à la représentation d'un avatar, dont les mouvements sont calqués sur ceux enregistrés par les capteurs. Mais aussi compiler certaines données brutes pour en faire des indicateurs.

7.2.6. Publications

Cette proposition méthodologique a fait l'objet d'une publication dans la revue *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* [276] :

F. Muhla, F. Clanché, C. Rose, A. Cosson, et G. Gauchard, « Biomechanical and human behavior assessment using virtual reality to challenge balance and posture for the elderly and patients with Parkinson's disease », *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, vol. 20, n° sup1, p. 141-142, oct. 2017, doi: 10.1080/10255842.2017.1382901.

Elle a également fait l'objet d'un travail publié comme article de colloque dans le cadre des interfaces et interactions Homme/Machine [277] :

F. Clanché, A. Cosson, F. Muhla, et G. Gauchard, « Virtual reality-based scenarios for fall preventions », in *Proceedings of the 29th Conference on l'Interaction Homme-Machine - IHM '17*, Poitiers, France, 2018, p. 187-197, doi: 10.1145/3132129.3132148.

7.3. Mise au point d'un démonstrateur estimant le risque de chute

Un protocole tel que PrévSim, s'il est ambitieux d'un point de vue purement recherche, est tout bonnement impossible à déployer tel quel dans un contexte médical d'évaluation du risque de chute. Trop lourd en termes d'équipement et de traitement de données, il est nécessaire de développer une base simplifiée susceptible de satisfaire aux exigences d'un cabinet médical. Il faut donc développer un protocole de diagnostic du risque de chute simple d'un point de vue matériel et d'un point de vue mise en place, avec une automatisation importante du recueil et de l'interprétation des données.

C'est pourquoi, le projet financé par la Fondation MAIF, consiste à développer un examen déployable à grande échelle capable de caractériser, de manière précoce, les facteurs intrinsèques explicatifs de la chute comme l'attention, la fatigue ou encore les capacités d'adaptation cognitivo-motrices. L'exploitation d'une base de données partagée par les algorithmes d'intelligence artificielle et les techniques de traitement de signal permettra de construire un véritable outil d'aide à la décision afin que le praticien personnalise la prise en charge durant le parcours du patient. Ce projet condense ainsi un certain nombre d'idées découlant à la fois des travaux sur le train virtuel et des ambitions de PrévSim.

7.3.1. Réalité virtuelle

Les développements en cours sur ce projet pour la réalité virtuelle utilisent une tâche locomotrice contextualisée dans un environnement familier (cuisine + salon).

Le système doit être léger pour faciliter la mise en place et l'utilisation par des praticiens de santé qui souhaiteraient s'en équiper. C'est pourquoi il a été envisagé de n'utiliser que des systèmes commercialisés auprès du grand public, à savoir un ordinateur suffisamment puissant pour une expérience virtuelle satisfaisante, un visiocasque HTC Vive Pro avec module de transmission sans-fil, ses deux manettes et plusieurs trackers.

Avec un système d'attaches velcro, on placera les trackers sur différentes parties du corps pour d'une part animer l'avatar, en faisant appel notamment à de la cinématique inverse, qui

sera vu à la première personne pour une expérience égocentrée mais aussi pour recueillir des données cinématiques.

7.3.2. Métrologie

Objectif de légèreté à l'utilisation là encore, si une partie des métriques sera recueillie par le système de réalité virtuelle, l'autre partie a fait l'objet de développements à base d'accéléromètres. Un accéléromètre placé sur le patient recueille des données cinématiques lors de l'exécution du Timed Up and Go. Ere numérique oblige, l'accéléromètre est utilisé en connexion avec un smartphone et une application dédiée. Le capteur utilise du Bluetooth low energy (faible consommation) pour la transmission sans fil des données vers l'application qui, elle, transfère ces données sur un serveur agréé pour le stockage de données de santé. Des questionnaires serviront à quantifier le niveau de peur de chuter FES-I Short de Kempen [278], une version raccourcie du FES [249, 279] avec seulement 7 questions.

7.3.3. Machine Learning

Encore une fois inspiré de PrévSim, les données recueillies feront l'objet de traitements mathématiques et statistiques dans deux objectifs distincts :

- Le premier consiste à analyser les données afin de reconnaître automatiquement les différentes phases du Timed Up and Go, ce qui permettra notamment de s'affranchir du long et fastidieux travail d'analyse vidéo comme effectué à l'occasion de cette thèse.
- Le second objectif consiste à modéliser une cinématique type pour chaque catégorie de patients (à risque de chute, non à risque de chute). Les données mesurées par le système seront complétées de données d'ordre médical pour affiner les modèles. Un suivi des chutes post-évaluation constituera la donnée de sortie de chaque patient pour l'apprentissage.

L'intérêt des algorithmes d'apprentissage est de fournir de manière quasi-directe l'information attendue par le praticien à savoir si son patient est à risque de chute et s'il est nécessaire de proposer une prise en charge adaptée.

7.4. Evaluation du sentiment de présence avec la représentation du corps dans l'environnement virtuel.

Une des limites du train virtuel est l'absence de représentation visuelle des segments de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. C'est une limite importante qui peut notamment impacter lourdement les personnes atteintes de la maladie de Parkinson. En effet, en guise de mécanisme compensatoire d'un déficit proprioceptif [280], il est important pour ces personnes d'avoir un retour visuel, notamment de leurs segments, pour améliorer leur motricité [281, 282, 283]. C'est pourquoi, après avoir évalué le sentiment de présence dans un environnement virtuel spécifique étant l'environnement train, il sera intéressant de réitérer cette évaluation avec la scène proposée dans le paragraphe 7.3.1 (p.140). En effet, cette expérience virtuelle, si elle propose également des déplacements dans l'environnement virtuel, elle ajoute surtout à notre expérience initiale la représentation virtuelle du corps et donc sa visualisation en temps réel dans le visiocasque.

Quel peut être l'impact de la visualisation de son propre corps (sous la forme d'un avatar) sur le sentiment de présence ? Si de prime abord, nous estimons que cet ajout, considéré comme une amélioration au moins de l'immersion, devrait aussi améliorer le sentiment de présence, nous verrons si cette représentation se montre suffisamment cohérente pour effectivement augmenter le sentiment de présence.

En opposition, serait-il possible d'évaluer un sentiment de présence à l'usage de technologie de réalité mixte ? Le réalisme de l'environnement réel vu au travers du verre fumé peut-il améliorer le sentiment de présence dans cet environnement lorsqu'on lui ajoute des éléments virtuels, aussi cohérents puissent-ils être lorsqu'ils sont superposés à l'environnement réel ? La notion de présence pourrait tout à fait être remise en question à l'usage de tels dispositifs qui n'isolent pas l'utilisateur mais qui modifient la perception du réel.

VIII. Conclusion

Les quatre études menées mettent en lumière l'effet général d'un système de réalité virtuelle actuel sur le comportement moteur de son utilisateur. Placé dans la perspective d'un outil d'évaluation motrice ou plus spécifiquement du risque de chute auprès d'un public âgé, nous avons montré qu'un tel système a une influence significative sur des actions simples telles que celles qu'on retrouve dans le test Timed Up and Go à savoir de la marche des changements de direction et des assises et levés de chaise. Nous avons, en effet, montré que le temps et le nombre de pas nécessaires pour compléter un test Timed Up and Go étaient plus élevés en réalité virtuelle immersive et que cet effet n'était pas nécessairement dû à l'âge, tandis que le sentiment de présence montre des différences générationnelles. Cette influence est un paramètre à prendre en compte pour de futures évaluations impliquant la réalité virtuelle. On devrait même envisager que des tâches plus complexes, plus interactives, incluant éventuellement des tâches cognitives ou attentionnelles plus importantes voire de la double tâche, puissent moduler l'influence que nous avons pu observer dans ces paradigmes simples.

Les travaux de cette thèse ont finalement pour objectif de permettre aux chercheurs désireux d'intégrer les technologies récentes à leurs études, de bénéficier d'une vision globale des possibilités offertes d'un point de vue technologique d'une part et de la modification comportementale induite par cette introduction de la réalité virtuelle d'autre part. Les évolutions technologiques mises en avant dès l'introduction, je l'espère, vous permettront de comprendre d'où vient la réalité virtuelle et où elle est susceptible d'aller à plus ou moins long terme, par sa démocratisation et son accessibilité par le grand public. L'investissement matériel réduit et les développements simplifiés ouvrent de vastes perspectives d'utilisation de la réalité virtuelle immersive à la fois dans les sciences dures et les sciences humaines.

Dans les domaines de la réadaptation par exemple, où la réalité virtuelle non immersive a déjà fait ses preuves en partie dans l'évaluation mais surtout dans l'amélioration ou tout du moins l'entretien des capacités des personnes âgées, de nombreux développements sont à attendre pour l'implantation de cette technologie en remplacement ou en complément de l'existant. Ces travaux se positionnent donc comme une réflexion préliminaire à la réalisation de nouvelles applications, aux choix technologiques et à la prise en compte des effets que nous avons observés.

Bibliographie

- [1] “L’Hôpital Virtuel de Lorraine offre aux étudiants et aux professionnels de santé des formations par la simulation-Projets,” https://ec.europa.eu/regional_policy/fr/projects/france/lhopital-virtuel-de-lorraine-offre-aux-etudiants-et-aux-professionnels-de-sante-des-formations-par-la-simulation
- [2] **Hauer, K.**, “Systematic review of definitions and methods of measuring falls in randomised controlled fall prevention trials,” *Age and Ageing*, **35** (1), pp. 5–10 (2006)
- [3] **Hoops, M.L., N.J. Rosenblatt, C.P. Hurt, J. Crenshaw, and M.D. Grabiner**, “Does lower extremity osteoarthritis exacerbate risk factors for falls in older adults?,” *Women’s Health (London, England)*, **8** (6), pp. 685–696; quiz 697–698 (2012)
- [4] **Grabiner, M.D., and D.W. Jahnigen**, “Modeling recovery from stumbles: preliminary data on variable selection and classification efficacy,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **40** (9), pp. 910–913 (1992)
- [5] **Owings, T.M., M.J. Pavol, K.T. Foley, P.C. Grabiner, and M.D. Grabiner**, “Exercise: Is It a Solution to Falls by Older Adults?,” *Journal of Applied Biomechanics*, **15** (1), pp. 56–63 (1999)
- [6] **Lord, S.R., J.A. Ward, P. Williams, and K.J. Anstey**, “An epidemiological study of falls in older community-dwelling women: the Randwick falls and fractures study,” *Australian Journal of Public Health*, **17** (3), pp. 240–245 (1993)
- [7] **Rubenstein, L.Z., A.S. Robbins, B.L. Schulman, J. Rosado, D. Osterweil, and K.R. Josephson**, “Falls and instability in the elderly,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **36** (3), pp. 266–278 (1988)
- [8] **Lord, S.R., R.D. Clark, and I.W. Webster**, “Physiological factors associated with falls in an elderly population,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **39** (12), pp. 1194–1200 (1991)
- [9] **Northridge, M.E., M.C. Nevitt, J.L. Kelsey, and B. Link**, “Home hazards and falls in the elderly: the role of health and functional status.,” *American Journal of Public Health*, **85** (4), pp. 509–515 (1995)
- [10] **Speechley, M., and M. Tinetti**, “Falls and injuries in frail and vigorous community elderly persons,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **39** (1), pp. 46–52 (1991)
- [11] **Tinetti, M.E., M. Speechley, and S.F. Ginter**, “Risk factors for falls among elderly persons living in the community,” *The New England Journal of Medicine*, **319** (26), pp. 1701–1707 (1988)
- [12] **Prudham, D., and J.G. Evans**, “Factors associated with falls in the elderly: a community study,” *Age and Ageing*, **10** (3), pp. 141–146 (1981)

- [13] **Stevens, J.A., P.S. Corso, E.A. Finkelstein, and T.R. Miller**, “The costs of fatal and non-fatal falls among older adults,” *Injury Prevention: Journal of the International Society for Child and Adolescent Injury Prevention*, **12** (5), pp. 290–295 (2006)
- [14] **Stevens, J.A., K.A. Mack, L.J. Paulozzi, and M.F. Ballesteros**, “Self-reported falls and fall-related injuries among persons aged ≥ 65 years--United States, 2006,” *Journal of Safety Research*, **39** (3), pp. 345–349 (2008)
- [15] **Gillespie, L.D., M.C. Robertson, W.J. Gillespie, et al.**, “Interventions for preventing falls in older people living in the community,” *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, (9), p. CD007146 (2012)
- [16] **Richard, J.-B., B. Thélot, and F. Beck**, “Les accidents en France : évolution et facteurs associés,” *Revue d’Épidémiologie et de Santé Publique*, **61** (3), pp. 205–212 (2013)
- [17] **Société Française de Documentation et de Recherche en Médecine Générale (SFDRMG)**, “Prévention des chutes accidentelles chez la personne âgée : argumentaire,” *Saint-Denis : Haute Autorité de Santé*, p. 69p (2005)
- [18] **Léon, C., and F. Beck**, “Les comportements de santé des 55-85 ans analyses du Baromètre santé 2010,” Inpes éd., Saint-Denis (2014).
- [19] **Painter, J.A., and S.J. Elliott**, “Influence of Gender on Falls,” *Physical & Occupational Therapy In Geriatrics*, **27** (6), pp. 387–404 (2009)
- [20] **Hanlon, J.T., L.R. Landerman, G.G. Fillenbaum, and S. Studenski**, “Falls in African American and white community-dwelling elderly residents,” *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, **57** (7), pp. M473-478 (2002)
- [21] **Dargent-Molina, P., and G. Bréart**, “Épidémiologie des chutes et des traumatismes liés aux chutes chez les personnes âgées,” *Revue D’Épidémiologie et de Santé Publique*, **43** (1), pp. 72–83 (1995)
- [22] **Ricard, C., and B. Thélot**, “Plusieurs centaines de milliers de chutes chez les personnes âgées chaque année en France,” *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, (37–38), pp. 322–4 (2007)
- [23] **Legters, K.**, “Fear of falling,” *Physical Therapy*, **82** (3), pp. 264–272 (2002)
- [24] **Pin, S., D. Spini, J. Bodard, and P. Arwidson**, “Facteurs facilitant et entravant la participation des personnes âgées à des programmes de prévention des chutes : une revue de la littérature,” *Revue d’Épidémiologie et de Santé Publique*, **63** (2), pp. 105–118 (2015)
- [25] **Barry, Y., L. Lasbeur, and B. Thélot**, “Mortalité par accident de la vie courante en France métropolitaine, 2000-2008,” *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, (29–30), pp. 328–31 (2011)
- [26] **(Inserm), I. national de la santé et de la recherche médicale**, “Activité physique et prévention des chutes chez les personnes âgées,” Inserm, (2015).

- [27] **Bueno-Cavanillas, A., F. Padilla-Ruiz, J.J. Jiménez-Moleón, C.A. Peinado-Alonso, and R. Gálvez-Vargas**, “Risk factors in falls among the elderly according to extrinsic and intrinsic precipitating causes,” *European Journal of Epidemiology*, **16** (9), pp. 849–859 (2000)
- [28] **Formiga, F., A. Lopez-Soto, E. Duaso, et al.**, “Differences in the characteristics of elderly patients suffering from hip fracture due to falls according to place of residence,” *Journal of the American Medical Directors Association*, **8** (8), pp. 533–537 (2007)
- [29] **Luukinen, H., K. Koski, P. Laippala, and S.L. Kivelä**, “Predictors for recurrent falls among the home-dwelling elderly,” *Scandinavian Journal of Primary Health Care*, **13** (4), pp. 294–299 (1995)
- [30] **Nakagawa, H., K. Niu, A. Hozawa, et al.**, “Impact of nocturia on bone fracture and mortality in older individuals: a Japanese longitudinal cohort study,” *The Journal of Urology*, **184** (4), pp. 1413–1418 (2010)
- [31] **Campbell, A.J., and G.F. Spears**, “Fallers and non-fallers,” *Age and Ageing*, **19** (5), pp. 345–346 (1990)
- [32] **Nyman, S.R., C. Ballinger, J.E. Phillips, and R. Newton**, “Characteristics of outdoor falls among older people: a qualitative study,” *BMC Geriatrics*, **13**, p. 125 (2013)
- [33] **Morency, P., C. Voyer, S. Burrows, and S. Goudreau**, “Outdoor falls in an urban context: winter weather impacts and geographical variations,” *Canadian Journal of Public Health = Revue Canadienne De Sante Publique*, **103** (3), pp. 218–222 (2012)
- [34] **HAS**, “Évaluation et prise en charge des personnes âgées faisant des chutes répétées,” *Haute Autorité de Santé*, 2009. http://www.has-sante.fr/portail/jcms/c_793371/fr/evaluation-et-prise-en-charge-des-personnes-agees-faisant-des-chutes-repetees
- [35] **Fried, L.P., C.M. Tangen, J. Walston, et al.**, “Frailty in older adults: evidence for a phenotype,” *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, **56** (3), pp. M146-156 (2001)
- [36] **Bortz, W.M.**, “A conceptual framework of frailty: a review,” *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, **57** (5), pp. M283-288 (2002)
- [37] **Bandeem-Roche, K., Q.-L. Xue, L. Ferrucci, et al.**, “Phenotype of frailty: characterization in the women’s health and aging studies,” *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, **61** (3), pp. 262–266 (2006)
- [38] **Tinetti, M.E., G. McAvay, and E. Claus**, “Does multiple risk factor reduction explain the reduction in fall rate in the Yale FICSIT Trial? Frailty and Injuries Cooperative Studies of Intervention Techniques,” *American Journal of Epidemiology*, **144** (4), pp. 389–399 (1996)
- [39] **Rosenberg, I.H.**, “Sarcopenia: origins and clinical relevance,” *The Journal of Nutrition*, **127** (5 Suppl), pp. 990S-991S (1997)

- [40] **Lexell, J.**, “Human aging, muscle mass, and fiber type composition,” *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, **50 Spec No**, pp. 11–16 (1995)
- [41] **Doherty, T.J., A.A. Vandervoort, and W.F. Brown**, “Effects of ageing on the motor unit: a brief review,” *Canadian Journal of Applied Physiology = Revue Canadienne De Physiologie Appliquee*, **18** (4), pp. 331–358 (1993)
- [42] **Cynober, L., M. Jourdan, C. Aussel, C. Guillet, S. Walrand, and Y. Boirie**, “Sarcopénie des sujets âgés: libérez les acides aminés!,” *Nutrition Clinique et Métabolisme*, **18** (4), pp. 198–204 (2004)
- [43] **Cruz-Jentoft, A.J., J.P. Baeyens, J.M. Bauer, et al.**, “Sarcopenia: European consensus on definition and diagnosis: Report of the European Working Group on Sarcopenia in Older People,” *Age and Ageing*, **39** (4), pp. 412–423 (2010)
- [44] **Buford, T.W., S.D. Anton, A.R. Judge, et al.**, “Models of accelerated sarcopenia: critical pieces for solving the puzzle of age-related muscle atrophy,” *Ageing Research Reviews*, **9** (4), pp. 369–383 (2010)
- [45] **Munro, H.N.**, “Adaptation of body protein metabolism in adult and aging man,” *Clinical Nutrition (Edinburgh, Scotland)*, **1** (2), pp. 95–108 (1982)
- [46] **Hughes, V.A., W.R. Frontera, R. Roubenoff, W.J. Evans, and M.A.F. Singh**, “Longitudinal changes in body composition in older men and women: role of body weight change and physical activity,” *The American Journal of Clinical Nutrition*, **76** (2), pp. 473–481 (2002)
- [47] **Rolland, Y., S. Czerwinski, G. Abellan Van Kan, et al.**, “Sarcopenia: its assessment, etiology, pathogenesis, consequences and future perspectives,” *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, **12** (7), pp. 433–450 (2008)
- [48] **Rolland, Y., and B. Vellas**, “La sarcopénie,” *La Revue de Médecine Interne*, **30** (2), pp. 150–160 (2009)
- [49] **Evans, W.**, “Functional and metabolic consequences of sarcopenia,” *The Journal of Nutrition*, **127** (5 Suppl), pp. 998S–1003S (1997)
- [50] **Roubenoff, R., and V.A. Hughes**, “Sarcopenia: current concepts,” *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, **55** (12), pp. M716–724 (2000)
- [51] **Morley, J.E., R.N. Baumgartner, R. Roubenoff, J. Mayer, and K.S. Nair**, “Sarcopenia,” *The Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, **137** (4), pp. 231–243 (2001)
- [52] **Vandervoort, A.A.**, “Aging of the human neuromuscular system,” *Muscle & Nerve*, **25** (1), pp. 17–25 (2002)
- [53] **Landi, F., R. Liperoti, A. Russo, et al.**, “Sarcopenia as a risk factor for falls in elderly individuals: results from the iLSIRENTE study,” *Clinical Nutrition (Edinburgh, Scotland)*, **31** (5), pp. 652–658 (2012)

- [54] **Bonnefoy, M., M. Jauffret, and J.F. Jusot**, “Muscle power of lower extremities in relation to functional ability and nutritional status in very elderly people,” *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, **11** (3), pp. 223–228 (2007)
- [55] **Nguyen, T., P. Sambrook, P. Kelly, et al.**, “Prediction of osteoporotic fractures by postural instability and bone density,” *BMJ (Clinical research ed.)*, **307** (6912), pp. 1111–1115 (1993)
- [56] **Nevitt, M.C., S.R. Cummings, S. Kidd, and D. Black**, “Risk factors for recurrent nonsyncopal falls. A prospective study,” *JAMA*, **261** (18), pp. 2663–2668 (1989)
- [57] **Moreland, J.D., J.A. Richardson, C.H. Goldsmith, and C.M. Clase**, “Muscle weakness and falls in older adults: a systematic review and meta-analysis,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **52** (7), pp. 1121–1129 (2004)
- [58] **Dargent-Molina, P., A.M. Schott, D. Hans, et al.**, “Separate and combined value of bone mass and gait speed measurements in screening for hip fracture risk: results from the EPIDOS study. Epidémiologie de l’Ostéoporose,” *Osteoporosis international: a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, **9** (2), pp. 188–192 (1999)
- [59] **Abellan van Kan, G., Y. Rolland, S. Andrieu, et al.**, “Gait speed at usual pace as a predictor of adverse outcomes in community-dwelling older people an International Academy on Nutrition and Aging (IANA) Task Force,” *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, **13** (10), pp. 881–889 (2009)
- [60] **Joseph, C., A.M. Kenny, P. Taxel, J.A. Lorenzo, G. Duque, and G.A. Kuchel**, “Role of endocrine-immune dysregulation in osteoporosis, sarcopenia, frailty and fracture risk,” *Molecular Aspects of Medicine*, **26** (3), pp. 181–201 (2005)
- [61] **Schneider, S.M., R. Al-Jaouni, X. Pivot, V.B. Braulio, P. Rampal, and X. Hebuterne**, “Lack of adaptation to severe malnutrition in elderly patients,” *Clinical Nutrition (Edinburgh, Scotland)*, **21** (6), pp. 499–504 (2002)
- [62] **Szulc, P., T.J. Beck, F. Marchand, and P.D. Delmas**, “Low skeletal muscle mass is associated with poor structural parameters of bone and impaired balance in elderly men—the MINOS study,” *Journal of Bone and Mineral Research: The Official Journal of the American Society for Bone and Mineral Research*, **20** (5), pp. 721–729 (2005)
- [63] “Consensus development conference: diagnosis, prophylaxis, and treatment of osteoporosis,” *The American Journal of Medicine*, **94** (6), pp. 646–650 (1993)
- [64] **Coughlan, T., and F. Dockery**, “Osteoporosis and fracture risk in older people,” *Clinical Medicine (London, England)*, **14** (2), pp. 187–191 (2014)
- [65] **Cooper, C., E.J. Atkinson, S.J. Jacobsen, W.M. O’Fallon, and L.J. Melton**, “Population-based study of survival after osteoporotic fractures,” *American Journal of Epidemiology*, **137** (9), pp. 1001–1005 (1993)
- [66] **Kanis, J.A., C. Cooper, R. Rizzoli, J.-Y. Reginster, and Scientific Advisory Board of the European Society for Clinical and Economic Aspects of Osteoporosis**

- (ESCEO) and the Committees of Scientific Advisors and National Societies of the International Osteoporosis Foundation (IOF), “European guidance for the diagnosis and management of osteoporosis in postmenopausal women,” *Osteoporosis international: a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, **30** (1), pp. 3–44 (2019)
- [67] **Kanis, J.A., A. Oden, O. Johnell, C. De Laet, B. Jonsson, and A.K. Oglesby**, “The components of excess mortality after hip fracture,” *Bone*, **32** (5), pp. 468–473 (2003)
- [68] **Jackson, R.D., and W.J. Mysiw**, “Insights into the epidemiology of postmenopausal osteoporosis: the Women’s Health Initiative,” *Seminars in Reproductive Medicine*, **32** (6), pp. 454–462 (2014)
- [69] **Tella, S.H., and J.C. Gallagher**, “Prevention and treatment of postmenopausal osteoporosis,” *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, **142**, pp. 155–170 (2014)
- [70] **da Silva, R.B., L. Costa-Paiva, S.S. Morais, R. Mezzalira, N. de O. Ferreira, and A.M. Pinto-Neto**, “Predictors of falls in women with and without osteoporosis,” *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, **40** (9), pp. 582–588 (2010)
- [71] **Arnold, C.M., A.J. Busch, C.L. Schachter, L. Harrison, and W. Olszynski**, “The relationship of intrinsic fall risk factors to a recent history of falling in older women with osteoporosis,” *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, **35** (7), pp. 452–460 (2005)
- [72] **Sinaki, M., R.H. Brey, C.A. Hughes, D.R. Larson, and K.R. Kaufman**, “Balance disorder and increased risk of falls in osteoporosis and kyphosis: significance of kyphotic posture and muscle strength,” *Osteoporosis international: a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, **16** (8), pp. 1004–1010 (2005)
- [73] **Oswald, A.E., S.R. Pye, T.W. O’Neill, et al.**, “Prevalence and associated factors for falls in women with established inflammatory polyarthritis,” *The Journal of Rheumatology*, **33** (4), pp. 690–694 (2006)
- [74] **Rubenstein, L.Z., and K.R. Josephson**, “The epidemiology of falls and syncope,” *Clinics in Geriatric Medicine*, **18** (2), pp. 141–158 (2002)
- [75] “Arthrose,” *Inserm - La science pour la santé*. <https://www.inserm.fr/information-essante/dossiers-information/arthrose>
- [76] **Foley, A.L., S. Loharuka, J.A. Barrett, et al.**, “Association between the Geriatric Giants of urinary incontinence and falls in older people using data from the Leicestershire MRC Incontinence Study,” *Age and Ageing*, **41** (1), pp. 35–40 (2012)
- [77] **Teo, J.S.H., N.K. Briffa, A. Devine, S.S. Dhaliwal, and R.L. Prince**, “Do sleep problems or urinary incontinence predict falls in elderly women?,” *The Australian Journal of Physiotherapy*, **52** (1), pp. 19–24 (2006)

- [78] **Vaughan, C.P., C.J. Brown, P.S. Goode, K.L. Burgio, R.M. Allman, and T.M. Johnson**, “The association of nocturia with incident falls in an elderly community-dwelling cohort,” *International Journal of Clinical Practice*, **64** (5), pp. 577–583 (2010)
- [79] **Bliwise, D.L., D.J. Foley, M.V. Vitiello, F.P. Ansari, S. Ancoli-Israel, and J.K. Walsh**, “Nocturia and disturbed sleep in the elderly,” *Sleep Medicine*, **10** (5), pp. 540–548 (2009)
- [80] **Cote, K.A., C.E. Milner, S.L. Osip, L.B. Ray, and K.D. Baxter**, “Waking Quantitative Electroencephalogram and Auditory Event-Related Potentials Following Experimentally Induced Sleep Fragmentation,” *Sleep*, **26** (6), pp. 687–694 (2003)
- [81] **Ohayon, M.M.**, “Nocturnal awakenings and comorbid disorders in the American general population,” *Journal of Psychiatric Research*, **43** (1), pp. 48–54 (2008)
- [82] **Asplund, R., S.-U. Marnetoft, J. Selander, and B. Akerström**, “Nocturia in relation to somatic health, mental health and pain in adult men and women,” *BJU international*, **95** (6), pp. 816–819 (2005)
- [83] **Yu, H.-J., F.-Y. Chen, P.-C. Huang, T.H.-H. Chen, W.-C. Chie, and C.-Y. Liu**, “Impact of nocturia on symptom-specific quality of life among community-dwelling adults aged 40 years and older,” *Urology*, **67** (4), pp. 713–718 (2006)
- [84] **Brown, J.S.**, “Epidemiology and changing demographics of overactive bladder: a focus on the postmenopausal woman,” *Geriatrics*, **57 Suppl 1**, pp. 6–12 (2002)
- [85] **Lestienne, F., J. Soechting, and A. Berthoz**, “Postural readjustments induced by linear motion of visual scenes,” *Experimental Brain Research*, **28** (3–4), pp. 363–384 (1977)
- [86] **Wormald, R.P., L.A. Wright, P. Courtney, B. Beaumont, and A.P. Haines**, “Visual problems in the elderly population and implications for services,” *BMJ (Clinical research ed.)*, **304** (6836), pp. 1226–1229 (1992)
- [87] **Abdelhafiz, A.H., and C.A. Austin**, “Visual factors should be assessed in older people presenting with falls or hip fracture,” *Age and Ageing*, **32** (1), pp. 26–30 (2003)
- [88] **Klein, B.E.K., S.E. Moss, R. Klein, K.E. Lee, and K.J. Cruickshanks**, “Associations of visual function with physical outcomes and limitations 5 years later in an older population: the Beaver Dam eye study,” *Ophthalmology*, **110** (4), pp. 644–650 (2003)
- [89] **Szabo, S.M., P.A. Janssen, K. Khan, M.J. Potter, and S.R. Lord**, “Older women with age-related macular degeneration have a greater risk of falls: a physiological profile assessment study,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **56** (5), pp. 800–807 (2008)
- [90] **Wood, J.M., P. Lacherez, A.A. Black, M.H. Cole, M.Y. Boon, and G.K. Kerr**, “Risk of falls, injurious falls, and other injuries resulting from visual impairment among older adults with age-related macular degeneration,” *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **52** (8), pp. 5088–5092 (2011)
- [91] **Asbell, P.A., I. Dualan, J. Mindel, D. Brocks, M. Ahmad, and S. Epstein**, “Age-related cataract,” *Lancet (London, England)*, **365** (9459), pp. 599–609 (2005)

- [92] **Harwood, R.H., A.J.E. Foss, F. Osborn, R.M. Gregson, A. Zaman, and T. Masud**, “Falls and health status in elderly women following first eye cataract surgery: a randomised controlled trial,” *The British Journal of Ophthalmology*, **89** (1), pp. 53–59 (2005)
- [93] **Cumming, R.G., R. Ivers, L. Clemson, et al.**, “Improving vision to prevent falls in frail older people: a randomized trial,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **55** (2), pp. 175–181 (2007)
- [94] **Foss, A.J.E., R.H. Harwood, F. Osborn, R.M. Gregson, A. Zaman, and T. Masud**, “Falls and health status in elderly women following second eye cataract surgery: a randomised controlled trial,” *Age and Ageing*, **35** (1), pp. 66–71 (2006)
- [95] **Dhital, A., T. Pey, and M.R. Stanford**, “Visual loss and falls: a review,” *Eye (London, England)*, **24** (9), pp. 1437–1446 (2010)
- [96] **Tinetti, M.E., J. Doucette, E. Claus, and R. Marottoli**, “Risk factors for serious injury during falls by older persons in the community,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **43** (11), pp. 1214–1221 (1995)
- [97] **Lin, F.R., and L. Ferrucci**, “Hearing Loss and Falls Among Older Adults in the United States,” *Archives of internal medicine*, **172** (4), pp. 369–371 (2012)
- [98] **Viljanen, A., J. Kaprio, I. Pyykkö, et al.**, “Hearing as a Predictor of Falls and Postural Balance in Older Female Twins,” *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, **64A** (2), pp. 312–317 (2009)
- [99] **Viljanen, A., J. Kaprio, I. Pyykkö, M. Sorri, M. Koskenvuo, and T. Rantanen**, “Hearing acuity as a predictor of walking difficulties in older women,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **57** (12), pp. 2282–2286 (2009)
- [100] **Skalska, A., B. Wizner, K. Piotrowicz, et al.**, “The prevalence of falls and their relation to visual and hearing impairments among a nation-wide cohort of older Poles,” *Experimental Gerontology*, **48** (2), pp. 140–146 (2013)
- [101] **Guest, S., A. Mehrabyan, R. Ackerley, F. McGlone, N. Phillips, and G. Essick**, “Tactile experience does not ameliorate age-related reductions in sensory function,” *Experimental Aging Research*, **40** (1), pp. 81–106 (2014)
- [102] **Manning, H., and F. Tremblay**, “Age differences in tactile pattern recognition at the fingertip,” *Somatosensory & Motor Research*, **23** (3–4), pp. 147–155 (2006)
- [103] **Norman, J.F., A.M.L. Kappers, A.M. Beers, A.K. Scott, H.F. Norman, and J.J. Koenderink**, “Aging and the haptic perception of 3D surface shape,” *Attention, Perception & Psychophysics*, **73** (3), pp. 908–918 (2011)
- [104] **Norman, J.F., A.M.L. Kappers, J.R. Cheeseman, et al.**, “Aging and curvature discrimination from static and dynamic touch,” *PloS One*, **8** (7), p. e68577 (2013)
- [105] **Norman, J.F., C.E. Crabtree, H.F. Norman, B.K. Moncrief, M. Herrmann, and N. Kapley**, “Aging and the visual, haptic, and cross-modal perception of natural object shape,” *Perception*, **35** (10), pp. 1383–1395 (2006)

- [106] **Norman, J.F., O.C. Adkins, S.C. Hoyng, C.J. Dowell, L.E. Pedersen, and A.N. Gilliam**, “Aging and the Haptic Perception of Material Properties,” *Perception*, **45** (12), pp. 1387–1398 (2016)
- [107] **LaRoche, D.P., B.L. Greenleaf, R.V. Croce, and J.A. McGaughy**, “Interaction of age, cognitive function, and gait performance in 50-80-year-olds,” *Age (Dordrecht, Netherlands)*, **36** (4), p. 9693 (2014)
- [108] **Timsina, L.R., J.L. Willetts, M.J. Brennan, et al.**, “Circumstances of fall-related injuries by age and gender among community-dwelling adults in the United States,” *PloS One*, **12** (5), p. e0176561 (2017)
- [109] **Harboun, M.**, “Épidémiologie des comorbidités chez les personnes âgées,” *NPG Neurologie - Psychiatrie - Gériatrie*, **7** (37), pp. 11–13 (2007)
- [110] **Lord, S.R., K. Delbaere, and D.L. Sturnieks**, “Chapter 10 - Aging,” in B. L. Day and S. R. Lord, eds., , “Handbook of Clinical Neurology,” Elsevier, , pp. 157–171 (2018).
- [111] **Salzman, B.**, “Gait and balance disorders in older adults,” *American Family Physician*, **82** (1), pp. 61–68 (2010)
- [112] **Mahlknecht, P., S. Kiechl, B.R. Bloem, et al.**, “Prevalence and Burden of Gait Disorders in Elderly Men and Women Aged 60–97 Years: A Population-Based Study,” *PLoS ONE*, **8** (7), (2013)
- [113] **Pirker, W., and R. Katzenschlager**, “Gait disorders in adults and the elderly: A clinical guide,” *Wiener klinische Wochenschrift*, **129** (3–4), pp. 81–95 (2017)
- [114] **Ebersbach, G., M. Sojer, J. Müller, M. Heijmenberg, and W. Poewe**, “Sociocultural differences in gait,” *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society*, **15** (6), pp. 1145–1147 (2000)
- [115] **Ashton-Miller, J.**, “Age-Associated Changes in the Biomechanics of Gait and Gait-Related Falls in Older Adults,” in J. Hausdorff and N. Alexander, eds., , “Gait Disorders,” CRC Press, , pp. 63–100 (2005).
- [116] **Brach, J.S., S. Perera, J.M. VanSwearingen, E.S. Hile, D.M. Wert, and S.A. Studenski**, “Challenging gait conditions predict 1-year decline in gait speed in older adults with apparently normal gait,” *Physical Therapy*, **91** (12), pp. 1857–1864 (2011)
- [117] **Fritz, S., and M. Lusardi**, “White paper: ‘walking speed: the sixth vital sign,’” *Journal of Geriatric Physical Therapy (2001)*, **32** (2), pp. 46–49 (2009)
- [118] **Lee, I.-M., and D.M. Buchner**, “The importance of walking to public health,” *Medicine and Science in Sports and Exercise*, **40** (7 Suppl), pp. S512-518 (2008)
- [119] **Campbell, A.J., M.C. Robertson, M.M. Gardner, R.N. Norton, M.W. Tilyard, and D.M. Buchner**, “Randomised controlled trial of a general practice programme of home based exercise to prevent falls in elderly women,” *BMJ (Clinical research ed.)*, **315** (7115), pp. 1065–1069 (1997)

- [120] **Ebrahim, S., P.W. Thompson, V. Baskaran, and K. Evans**, “Randomized placebo-controlled trial of brisk walking in the prevention of postmenopausal osteoporosis,” *Age and Ageing*, **26** (4), pp. 253–260 (1997)
- [121] **Overstall, P.W., A.N. Exton-Smith, F.J. Imms, and A.L. Johnson**, “Falls in the elderly related to postural imbalance,” *British Medical Journal*, **1** (6056), pp. 261–264 (1977)
- [122] **Bergland, A., A.M. Pettersen, and K. Laake**, “Falls reported among elderly Norwegians living at home,” *Physiotherapy Research International: The Journal for Researchers and Clinicians in Physical Therapy*, **3** (3), pp. 164–174 (1998)
- [123] **Bergland, A., G.-B. Jarnlo, and K. Laake**, “Predictors of falls in the elderly by location,” *Aging Clinical and Experimental Research*, **15** (1), pp. 43–50 (2003)
- [124] **Voukelatos, A., D. Merom, C. Rissel, C. Sherrington, W. Watson, and K. Waller**, “The effect of walking on falls in older people: the ‘Easy Steps to Health’ randomized controlled trial study protocol,” *BMC Public Health*, **11**, p. 888 (2011)
- [125] **Kelsey, J.L., S.D. Berry, E. Procter-Gray, et al.**, “Indoor and outdoor falls in older adults are different: the maintenance of balance, independent living, intellect, and Zest in the Elderly of Boston Study,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **58** (11), pp. 2135–2141 (2010)
- [126] **Imms, F.J., and O.G. Edholm**, “Studies of gait and mobility in the elderly,” *Age and Ageing*, **10** (3), pp. 147–156 (1981)
- [127] **Quach, L., A.M. Galica, R.N. Jones, et al.**, “The nonlinear relationship between gait speed and falls: the Maintenance of Balance, Independent Living, Intellect, and Zest in the Elderly of Boston Study,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **59** (6), pp. 1069–1073 (2011)
- [128] **Lipsitz, L.A., P.V. Jonsson, M.M. Kelley, and J.S. Koestner**, “Causes and correlates of recurrent falls in ambulatory frail elderly,” *Journal of Gerontology*, **46** (4), pp. M114–122 (1991)
- [129] **Guimaraes, R.M., and B. Isaacs**, “Characteristics of the gait in old people who fall,” *International Rehabilitation Medicine*, **2** (4), pp. 177–180 (1980)
- [130] **Tinetti, M.E., T.F. Williams, and R. Mayewski**, “Fall risk index for elderly patients based on number of chronic disabilities,” *The American Journal of Medicine*, **80** (3), pp. 429–434 (1986)
- [131] **Wolfson, L., R. Whipple, P. Amerman, and J.N. Tobin**, “Gait assessment in the elderly: a gait abnormality rating scale and its relation to falls,” *Journal of Gerontology*, **45** (1), pp. M12–19 (1990)
- [132] **Woo, J., S.C. Ho, J. Lau, S.G. Chan, and Y.K. Yuen**, “Age-associated gait changes in the elderly: pathological or physiological?,” *Neuroepidemiology*, **14** (2), pp. 65–71 (1995)

- [133] **Gehlsen, G.M., and M.H. Whaley**, “Falls in the elderly: Part I, Gait,” *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **71** (10), pp. 735–738 (1990)
- [134] **Kenny, R.A., D.A. Richardson, N. Steen, R.S. Bexton, F.E. Shaw, and J. Bond**, “Carotid sinus syndrome: a modifiable risk factor for nonaccidental falls in older adults (SAFE PACE),” *Journal of the American College of Cardiology*, **38** (5), pp. 1491–1496 (2001)
- [135] **Sutton, R.**, “Clinical classification of syncope,” *Progress in Cardiovascular Diseases*, **55** (4), pp. 339–344 (2013)
- [136] **Ricci, F., R. De Caterina, and A. Fedorowski**, “Orthostatic Hypotension,” *Journal of the American College of Cardiology*, **66** (7), pp. 848–860 (2015)
- [137] **Gunderman, R.**, “The Challenge of Treating ‘Frailty,’” *The Atlantic*, 2014. <https://www.theatlantic.com/health/archive/2014/12/the-challenge-of-treating-frailty/383327/>
- [138] **Donatelli, N.S., and J. Somes**, “What is Frailty?,” *Journal of emergency nursing: JEN: official publication of the Emergency Department Nurses Association*, **43** (3), pp. 272–274 (2017)
- [139] **Clegg, A., J. Young, S. Iliffe, M.O. Rikkert, and K. Rockwood**, “Frailty in elderly people,” *The Lancet*, **381** (9868), pp. 752–762 (2013)
- [140] **Puisieux, F.**, “Get Up and Go Test et Timed Up and Go Test : 2 tests pour évaluer très simplement le risque de chuteLa Revue de Geriatrie,” **40** (6), p. 366 (2015)
- [141] **Mathias, S., U.S. Nayak, and B. Isaacs**, “Balance in elderly patients: the ‘get-up and go’ test,” *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **67** (6), pp. 387–389 (1986)
- [142] **Podsiadlo, D., and S. Richardson**, “The timed ‘Up & Go’: a test of basic functional mobility for frail elderly persons,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **39** (2), pp. 142–148 (1991)
- [143] **Berg, K.O., S.L. Wood-Dauphinee, J.I. Williams, and D. Gayton**, “Measuring balance in the elderly: preliminary development of an instrument,” *Physiotherapy Canada*, **41** (6), pp. 304–311 (1989)
- [144] **Berg, K.O., S.L. Wood-Dauphinee, J.I. Williams, and B. Maki**, “Measuring balance in the elderly: validation of an instrument,” *Canadian Journal of Public Health = Revue Canadienne De Sante Publique*, **83 Suppl 2**, pp. S7-11 (1992)
- [145] **Mahoney, F.I., and D.W. Barthel**, “FUNCTIONAL EVALUATION: THE BARTHEL INDEX,” *Maryland State Medical Journal*, **14**, pp. 61–65 (1965)
- [146] **Barry, E., R. Galvin, C. Keogh, F. Horgan, and T. Fahey**, “Is the Timed Up and Go test a useful predictor of risk of falls in community dwelling older adults: a systematic review and meta- analysis,” *BMC Geriatrics*, **14** (1), (2014)

- [147] **Alexandre, T.S., D.M. Meira, N.C. Rico, and S.K. Mizuta**, “Accuracy of Timed Up and Go Test for screening risk of falls among community-dwelling elderly,” *Revista Brasileira De Fisioterapia (Sao Carlos (Sao Paulo, Brazil))*, **16** (5), pp. 381–388 (2012)
- [148] **Shumway-Cook, A., S. Brauer, and M. Woollacott**, “Predicting the probability for falls in community-dwelling older adults using the Timed Up & Go Test,” *Physical Therapy*, **80** (9), pp. 896–903 (2000)
- [149] **HAS**, “Référentiel concernant l’évaluation du risque de chutes chez le sujet âgé autonome et sa prévention.,” 2012.
- [150] **Buatois, S., and A. Bénétos**, “Mise en place d’une échelle clinique simple pour évaluer le risque de chutes répétées chez les seniors: A simple clinical scale to assess risk of recurrent falls in older people,” *Kinésithérapie, la Revue*, **11** (111), pp. 45–48 (2011)
- [151] “Centre technique d’appui et de formation des Centres d’examens de santé. Etude PCPA (Prévention des chutes chez les personnes âgées). Approche comparative de différents tests diagnostiques du risque de chute. Etude prospective dans la population des Centres d’examens de santé.,” Saint-Etienne: CETAF (2009).
- [152] **Promsri, A., T. Haid, and P. Federolf**, “How does lower limb dominance influence postural control movements during single leg stance?,” *Human Movement Science*, **58**, pp. 165–174 (2018)
- [153] **Bonora, G., M. Mancini, I. Carpinella, et al.**, “Investigation of Anticipatory Postural Adjustments during One-Leg Stance Using Inertial Sensors: Evidence from Subjects with Parkinsonism,” *Frontiers in Neurology*, **8**, p. 361 (2017)
- [154] **Asaeda, M., W. Kuwahara, N. Fujita, T. Yamasaki, and N. Adachi**, “Validity of motion analysis using the Kinect system to evaluate single leg stance in patients with hip disorders,” *Gait & Posture*, **62**, pp. 458–462 (2018)
- [155] **Kurz, E., O. Faude, R. Roth, L. Zahner, and L. Donath**, “Ankle muscle activity modulation during single-leg stance differs between children, young adults and seniors,” *European Journal of Applied Physiology*, **118** (2), pp. 239–247 (2018)
- [156] **Wild, D., U.S. Nayak, and B. Isaacs**, “Prognosis of falls in old people at home.,” *Journal of Epidemiology & Community Health*, **35** (3), pp. 200–204 (1981)
- [157] **Weiner, W.J., L.M. Nora, and R.H. Glantz**, “Elderly inpatients: postural reflex impairment,” *Neurology*, **34** (7), pp. 945–947 (1984)
- [158] **Horak, F.B., D.M. Wrisley, and J. Frank**, “The Balance Evaluation Systems Test (BESTest) to Differentiate Balance Deficits,” *Physical Therapy*, **89** (5), pp. 484–498 (2009)
- [159] **Shumway-Cook, A., and F.B. Horak**, “Assessing the influence of sensory interaction of balance. Suggestion from the field,” *Physical Therapy*, **66** (10), pp. 1548–1550 (1986)
- [160] **Duncan, R.P., A.L. Leddy, J.T. Cavanaugh, et al.**, “Comparative utility of the BESTest, mini-BESTest, and brief-BESTest for predicting falls in individuals with Parkinson disease: a cohort study,” *Physical Therapy*, **93** (4), pp. 542–550 (2013)

- [161] **Franchignoni, F., F. Horak, M. Godi, A. Nardone, and A. Giordano**, “Using psychometric techniques to improve the Balance Evaluation Systems Test: the mini-BESTest,” *Journal of Rehabilitation Medicine*, **42** (4), pp. 323–331 (2010)
- [162] **King, L.A., K.C. Priest, A. Salarian, D. Pierce, and F.B. Horak**, “Comparing the Mini-BESTest with the Berg Balance Scale to Evaluate Balance Disorders in Parkinson’s Disease,” *Parkinson’s Disease*, **2012**, p. 375419 (2012)
- [163] **Padgett, P.K., J.V. Jacobs, and S.L. Kasser**, “Is the BESTest at its best? A suggested brief version based on interrater reliability, validity, internal consistency, and theoretical construct,” *Physical Therapy*, **92** (9), pp. 1197–1207 (2012)
- [164] **Morse, J.M., R.M. Morse, and S.J. Tylko**, “Development of a Scale to Identify the Fall-Prone Patient,” *Canadian Journal on Aging / La Revue canadienne du vieillissement*, **8** (04), pp. 366–377 (1989)
- [165] **Unterberger, S.**, “Neue objektiv registrierbare Vestibularis-Körperdrehreaktion, erhalten durch Treten auf der Stelle. Der „Tretversuch”,” *Archiv für Ohren-, Nasen- und Kehlkopfhilkunde*, **145**, pp. 478–492 (1938)
- [166] **Hirsch, C.**, “XVIII A New Labyrinthine Reaction: ‘The Waltzing Test,’” *Annals of Otology, Rhinology & Laryngology*, **49** (1), pp. 232–238 (1940)
- [167] **Fukuda, T.**, “The stepping test: two phases of the labyrinthine reflex,” *Acta Oto-Laryngologica*, **50** (2), pp. 95–108 (1959)
- [168] **Butland, R.J., J. Pang, E.R. Gross, A.A. Woodcock, and D.M. Geddes**, “Two-, six-, and 12-minute walking tests in respiratory disease.,” *BMJ*, **284** (6329), pp. 1607–1608 (1982)
- [169] **Cooper, K.H.**, “A Means of Assessing Maximal Oxygen Intake: Correlation Between Field and Treadmill Testing,” *JAMA*, **203** (3), pp. 201–204 (1968)
- [170] **Guralnik, J.M., E.M. Simonsick, L. Ferrucci, et al.**, “A short physical performance battery assessing lower extremity function: association with self-reported disability and prediction of mortality and nursing home admission,” *Journal of Gerontology*, **49** (2), pp. M85-94 (1994)
- [171] **Csuka, M., and D.J. McCarty**, “Simple method for measurement of lower extremity muscle strength,” *The American Journal of Medicine*, **78** (1), pp. 77–81 (1985)
- [172] **Bohannon, R.W.**, “Reference values for the five-repetition sit-to-stand test: a descriptive meta-analysis of data from elders,” *Perceptual and Motor Skills*, **103** (1), pp. 215–222 (2006)
- [173] **Shumway-Cook, A., and M.H. Woollacott**, “Motor control: theory and practical applications,” Williams & Wilkins, Baltimore (1995).
- [174] **Shumway-Cook, A., and M.H. Woollacott**, “Motor control: translating research into clinical practice,” 4th ed ed., Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia (2012).

- [175] **Patla, A.E., and A. Shumway-Cook**, “Dimensions of Mobility: Defining the Complexity and Difficulty Associated with Community Mobility,” *Journal of Aging and Physical Activity*, **7** (1), pp. 7–19 (1999)
- [176] **Shumway-Cook, A., C.S. Taylor, P.N. Matsuda, M.T. Studer, and B.K. Whetten**, “Expanding the scoring system for the Dynamic Gait Index,” *Physical Therapy*, **93** (11), pp. 1493–1506 (2013)
- [177] **Shumway-Cook, A., P.N. Matsuda, and C. Taylor**, “Investigating the validity of the environmental framework underlying the original and modified Dynamic Gait Index,” *Physical Therapy*, **95** (6), pp. 864–870 (2015)
- [178] **Fuchs, P.**, “Les interfaces de la réalité virtuelle,” éditeur AJIIMD, (1996).
- [179] **Fuchs, P., and G. Moreau**, “Le traité de la réalité virtuelle (Volume 1),” École des Mines de Paris, Paris (2006).
- [180] **Fuchs, P., and G. Moreau**, “Le traité de la réalité virtuelle (Volume 2),” École des Mines de Paris, Paris (2006).
- [181] **Fuchs, P., and G. Moreau**, “Le traité de la réalité virtuelle (Volume 3),” École des Mines de Paris, Paris (2006).
- [182] **Slater, M.**, “A note on presence terminology,” *Presence connect*, **3** (3), pp. 1–5 (2003)
- [183] **Piaget, J., N. Chomsky, M. Piattelli-Palmarini, Y. Noizet, and C.R. pour une science de l’homme**, “Théories du langage, théories de l’apprentissage: le débat entre Jean Piaget et Noam Chomsky,” Éditions du Seuil, (1979).
- [184] **Fuchs, P.**, “Les casques de réalité virtuelle et de jeux vidéo,” Presses des Mines - Transvalor, Paris (2016).
- [185] **Waterworth, E.L., and J.A. Waterworth**, “Focus, locus, and sensus: the three dimensions of virtual experience,” *Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, **4** (2), pp. 203–213 (2001)
- [186] **Rendon, A.A., E.B. Lohman, D. Thorpe, E.G. Johnson, E. Medina, and B. Bradley**, “The effect of virtual reality gaming on dynamic balance in older adults,” *Age and Ageing*, **41** (4), pp. 549–552 (2012)
- [187] **Lee, G.-H.**, “Effects of virtual reality exercise program on balance in lower parkinsonism patients,” *Parkinsonism & Related Disorders*, **22**, p. e70 (2016)
- [188] **Singh, D.K.A., B.S. Rajaratnam, V. Palaniswamy, H. Pearson, V.P. Raman, and P.S. Bong**, “Participating in a virtual reality balance exercise program can reduce risk and fear of falls,” *Maturitas*, **73** (3), pp. 239–243 (2012)
- [189] **Cho, G.H., G. Hwangbo, and H.S. Shin**, “The Effects of Virtual Reality-based Balance Training on Balance of the Elderly,” *Journal of Physical Therapy Science*, **26** (4), pp. 615–617 (2014)

- [190] **Choi, S.D., L. Guo, D. Kang, and S. Xiong**, “Exergame technology and interactive interventions for elderly fall prevention: A systematic literature review,” *Applied Ergonomics*, **65**, pp. 570–581 (2017)
- [191] **Kawaida, Y., K. Fukudome, A. Uejima, et al.**, “Virtual reality training for fall prevention,” *Physiotherapy*, **101**, pp. e732–e733 (2015)
- [192] **Lim, J., J.-J. Cho, J. Kim, Y. Kim, and B. Yoon**, “Design of virtual reality training program for prevention of falling in the elderly: A pilot study on complex versus balance exercises,” *European Journal of Integrative Medicine*, **15**, pp. 64–67 (2017)
- [193] **Mirelman, A., L. Rochester, M. Reelick, et al.**, “V-TIME: a treadmill training program augmented by virtual reality to decrease fall risk in older adults: study design of a randomized controlled trial,” *BMC Neurology*, **13**, p. 15 (2013)
- [194] **Peruzzi, A., A. Cereatti, E. Aiello, U.D. Croce, and A. Mirelman**, “Gait parameters and lower limb joint kinematics of multiple sclerosis subjects undergoing a gait training based on treadmill and virtual reality,” *Gait & Posture*, **37**, pp. S7–S8 (2013)
- [195] **Mirelman, A., B.L. Patritti, P. Bonato, and J.E. Deutsch**, “Effects of virtual reality training on gait biomechanics of individuals post-stroke,” *Gait & Posture*, **31** (4), pp. 433–437 (2010)
- [196] **Park, D.-S., D.-G. Lee, K. Lee, and G. Lee**, “Effects of Virtual Reality Training using Xbox Kinect on Motor Function in Stroke Survivors: A Preliminary Study,” *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, **26** (10), pp. 2313–2319 (2017)
- [197] **de Bruin, E.D., D. Schoene, G. Pichierri, and S.T. Smith**, “Use of virtual reality technique for the training of motor control in the elderly: Some theoretical considerations,” *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie*, **43** (4), pp. 229–234 (2010)
- [198] **Mirelman, A., P. Bonato, and J.E. Deutsch**, “Effects of training with a robot-virtual reality system compared with a robot alone on the gait of individuals after stroke,” *Stroke*, **40** (1), pp. 169–174 (2009)
- [199] **Mirelman, A., I. Maidan, T. Herman, J.E. Deutsch, N. Giladi, and J.M. Hausdorff**, “Virtual reality for gait training: can it induce motor learning to enhance complex walking and reduce fall risk in patients with Parkinson’s disease?,” *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, **66** (2), pp. 234–240 (2011)
- [200] **Paolini, G., A. Peruzzi, A. Mirelman, et al.**, “Validation of a method for real time foot position and orientation tracking with Microsoft Kinect technology for use in virtual reality and treadmill based gait training programs,” *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, **22** (5), pp. 997–1002 (2014)
- [201] **Peruzzi, A., A. Cereatti, U. Della Croce, and A. Mirelman**, “Effects of a virtual reality and treadmill training on gait of subjects with multiple sclerosis: a pilot study,” *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, **5**, pp. 91–96 (2016)

- [202] **Mirelman, A., L. Rochester, I. Maidan, et al.**, “Addition of a non-immersive virtual reality component to treadmill training to reduce fall risk in older adults (V-TIME): a randomised controlled trial,” *The Lancet*, **388** (10050), pp. 1170–1182 (2016)
- [203] **Fuchs, P., G. Moreau, and B. Arnaldi**, “Le traité de la réalité virtuelle,” Presses de l’École des mines, Paris (2003).
- [204] **Ito, K., M. Tada, H. Ujike, and K. Hyodo**, “Effects of Weight and Balance of Head Mounted Display on Physical Load,” in J. Y. C. Chen and G. Fragomeni, eds., , “Virtual, Augmented and Mixed Reality. Multimodal Interaction,” Springer International Publishing, Cham, pp. 450–460 (2019).
- [205] **Knight, J.F., and C. Baber**, “Effect of head-mounted displays on posture,” *Human Factors*, **49** (5), pp. 797–807 (2007)
- [206] **Yan, Y., K. Chen, Y. Xie, Y. Song, and Y. Liu**, “The Effects of Weight on Comfort of Virtual Reality Devices,” in F. Rebelo and M. M. Soares, eds., , “Advances in Ergonomics in Design,” Springer International Publishing, Cham, pp. 239–248 (2019).
- [207] **Dunlap, P., S. Perera, J.M. VanSwearingen, D. Wert, and J.S. Brach**, “Transitioning to a Narrow Path: The Impact of Fear of Falling in Older Adults,” *Gait & posture*, **35** (1), pp. 92–95 (2012)
- [208] **Chihara, T., and A. Seo**, “Evaluation of physical workload affected by mass and center of mass of head-mounted display,” *Applied Ergonomics*, **68**, pp. 204–212 (2018)
- [209] **Hettinger, L.J., and G.E. Riccio**, “Visually Induced Motion Sickness in Virtual Environments,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, **1** (3), pp. 306–310 (1992)
- [210] **McCauley, M.E., and T.J. Sharkey**, “Cybersickness: Perception of Self-Motion in Virtual Environments,” *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, **1** (3), pp. 311–318 (1992)
- [211] **LaViola Jr, J.J.**, “A discussion of cybersickness in virtual environments,” *ACM Sigchi Bulletin*, **32** (1), pp. 47–56 (2000)
- [212] **Sevinc, V., and M.I. Berkman**, “Psychometric evaluation of Simulator Sickness Questionnaire and its variants as a measure of cybersickness in consumer virtual environments,” *Applied Ergonomics*, **82**, p. 102958 (2020)
- [213] **Leigh, R.J., and D.S. Zee**, “The neurology of eye movements,” 5th edition ed., Oxford University Press, Oxford ; New York (2015).
- [214] **Pansell, T., J. Ygge, and H.D. Schworm**, “Conjugacy of torsional eye movements in response to a head tilt paradigm,” *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **44** (6), pp. 2557–2564 (2003)
- [215] **LaValle, S.**, “Virtual Reality,” Draft ed., Cambridge University Press, (2016).
- [216] **Minsky, M.**, “Telepresence,” (1980)

- [217] **Bouvier, P.**, “La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur.,” 2009. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00581550>
- [218] **Lombard, M., and T. Ditton**, “At the Heart of It All: The Concept of Presence,” *Journal of Computer-Mediated Communication*, **3** (2), pp. 0–0 (2006)
- [219] **Bouvier, P.**, “The Five Pillars of Presence: Guidelines to Reach Presence,” (2008).
- [220] **Slater, M., M. Usoh, and A. Steed**, “Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality,” *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, **2** (3), pp. 201–219 (1995)
- [221] **Slater, M., M. Usoh, and Y. Chrysanthou**, “The Influence of Dynamic Shadows on Presence in Immersive Virtual Environments,” in M. Göbel, ed., “Virtual Environments ’95,” Springer Vienna, Vienna, pp. 8–21 (1995).
- [222] **Slater, M., V. Linakis, M. Usoh, R. Kooper, and G. Street**, “Immersion, Presence, and Performance in Virtual Environments: An Experiment with Tri-Dimensional Chess,” *ACM Virtual Reality Software and Technology (VRST)*, (1996), 163–172.
- [223] **Witmer, B.G., and M.J. Singer**, “Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, **7** (3), pp. 225–240 (1998)
- [224] **Witmer, A., and M. Slater**, “Measuring Presence: A Response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire,” *Presence (Camb.)*, **8**, (1999)
- [225] **Schubert, T., F. Friedmann, and H. Regenbrecht**, “The Experience of Presence: Factor Analytic Insights,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, **10** (3), pp. 266–281 (2001)
- [226] **Lessiter, J., J. Freeman, E. Keogh, and J. Davidoff**, “A Cross-Media Presence Questionnaire: The ITC-Sense of Presence Inventory,” *Presence*, **10** (3), pp. 282–297 (2001)
- [227] **Muhla, F., F. Clanché, K. Duclos, et al.**, “Impact of using immersive virtual reality over time and steps in the Timed Up and Go test in elderly people,” *PLOS ONE*, **15** (3), p. e0229594 (2020)
- [228] **Kuo, F.-C., C.-Z. Hong, and B.-Y. Liao**, “Kinematics and muscle activity of the head, lumbar and knee joints during 180° turning and sitting down task in older adults,” *Clinical Biomechanics*, **29** (1), pp. 14–20 (2014)
- [229] **Patla, A.E., A. Adkin, and T. Ballard**, “Online steering: coordination and control of body center of mass, head and body reorientation,” *Experimental Brain Research*, **129** (4), pp. 629–634 (1999)
- [230] **Patla, A.E., S.D. Prentice, C. Robinson, and J. Neufeld**, “Visual control of locomotion: strategies for changing direction and for going over obstacles,” *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, **17** (3), pp. 603–634 (1991)

- [231] **Viaud-Delmon, I.**, “<http://igroup.org/pq/ipq/IPQtradVerOffice.doc>,”
- [232] **Lord, S.R., D.G. Lloyd, and S.K. Li**, “Sensori-motor function, gait patterns and falls in community-dwelling women,” *Age and Ageing*, **25** (4), pp. 292–299 (1996)
- [233] **Ferrandez, A.M., J. Pailhous, and M. Durup**, “Slowness in elderly gait,” *Experimental Aging Research*, **16** (1–2), pp. 79–89 (1990)
- [234] **Woollacott, M.H., and P.F. Tang**, “Balance control during walking in the older adult: research and its implications,” *Physical Therapy*, **77** (6), pp. 646–660 (1997)
- [235] **Winter, D.A., A.E. Patla, J.S. Frank, and S.E. Walt**, “Biomechanical walking pattern changes in the fit and healthy elderly,” *Physical Therapy*, **70** (6), pp. 340–347 (1990)
- [236] **Paquette, M.R., J.R. Fuller, A.L. Adkin, and L.A. Vallis**, “Age-related modifications in steering behaviour: effects of base-of-support constraints at the turn point,” *Experimental Brain Research*, **190** (1), pp. 1–9 (2008)
- [237] **Kingma, H., G.C. Gauchard, C. de Waele, et al.**, “Stocktaking on the development of posturography for clinical use,” *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, **21** (3), pp. 117–125 (2011)
- [238] **Paulus, W.M., A. Straube, and T. Brandt**, “Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects,” *Brain: A Journal of Neurology*, **107** (Pt 4), pp. 1143–1163 (1984)
- [239] **Thigpen, M.T., K.E. Light, G.L. Creel, and S.M. Flynn**, “Turning difficulty characteristics of adults aged 65 years or older,” *Physical Therapy*, **80** (12), pp. 1174–1187 (2000)
- [240] **Mohr, C., T. Landis, H.S. Bracha, and P. Brugger**, “Opposite Turning Behavior in Right-Handers and Non-Right-Handers Suggests a Link Between Handedness and Cerebral Dopamine Asymmetries,” *Behavioral Neuroscience*, **117** (6), pp. 1448–1452 (2003)
- [241] **Taylor, M.J.D., S.C. Strike, and P. Dabnichki**, “Turning bias and lateral dominance in a sample of able-bodied and amputee participants,” *Laterality*, **12** (1), pp. 50–63 (2007)
- [242] **Li, K.Z., U. Lindenberger, A.M. Freund, and P.B. Baltes**, “Walking while memorizing: age-related differences in compensatory behavior,” *Psychological Science*, **12** (3), pp. 230–237 (2001)
- [243] **Gage, W.H., R.J. Sleik, M.A. Polych, N.C. McKenzie, and L.A. Brown**, “The allocation of attention during locomotion is altered by anxiety,” *Experimental Brain Research*, **150** (3), pp. 385–394 (2003)
- [244] **Ellard, C.G., M.A. Goodale, and B. Timney**, “Distance estimation in the mongolian gerbil: The role of dynamic depth cues,” *Behavioural Brain Research*, **14** (1), pp. 29–39 (1984)

- [245] **Deviterne, D., G.C. Gauchard, M. Jamet, G. Vançon, and P.P. Perrin**, “Added cognitive load through rotary auditory stimulation can improve the quality of postural control in the elderly,” *Brain Research Bulletin*, **64** (6), pp. 487–492 (2005)
- [246] **Hicks, R., and M. Kinsbourne**, “Human handedness: a partial cross-fostering study,” *Science*, **192** (4242), pp. 908–910 (1976)
- [247] **Gilbert, A.N., and C.J. Wysocki**, “Hand preference and age in the United States,” *Neuropsychologia*, **30** (7), pp. 601–608 (1992)
- [248] **Coren, S., and C. Porac**, “Fifty centuries of right-handedness: the historical record,” *Science*, **198** (4317), pp. 631–632 (1977)
- [249] **Tinetti, M.E., D. Richman, and L. Powell**, “Falls efficacy as a measure of fear of falling,” *Journal of Gerontology*, **45** (6), pp. P239-243 (1990)
- [250] **Powell, L.E., and A.M. Myers**, “The Activities-specific Balance Confidence (ABC) Scale,” *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, **50A** (1), pp. M28-34 (1995)
- [251] **Hadjistavropoulos, T., R.R. Martin, D. Sharpe, A.C. Lints, D.R. McCreary, and G.J.G. Asmundson**, “A longitudinal investigation of fear of falling, fear of pain, and activity avoidance in community-dwelling older adults,” *Journal of Aging and Health*, **19** (6), pp. 965–984 (2007)
- [252] **Contreras-Vidal, J.L., HansL. Teulings, and GeorgeE. Stelmach**, “Elderly subjects are impaired in spatial coordination in fine motor control,” *Acta Psychologica*, **100** (1–2), pp. 25–35 (1998)
- [253] **Raz, N., K.M. Rodrigue, K.M. Kennedy, D. Head, F. Gunning-Dixon, and J.D. Acker**, “Differential aging of the human striatum: longitudinal evidence,” *American Journal of Neuroradiology*, **24** (9), pp. 1849–1856 (2003)
- [254] **Callisaya, M.L., R. Beare, T.G. Phan, et al.**, “Brain Structural Change and Gait Decline: A Longitudinal Population-Based Study,” *Journal of the American Geriatrics Society*, **61** (7), pp. 1074–1079 (2013)
- [255] **Judge, J.O., S. Öunpuu, and R.B. Davis**, “Effects of Age on the Biomechanics and Physiology of Gait,” *Clinics in Geriatric Medicine*, **12** (4), pp. 659–678 (1996)
- [256] **Barak, Y., R.C. Wagenaar, and K.G. Holt**, “Gait Characteristics of Elderly People With a History of Falls: A Dynamic Approach,” *Physical Therapy*, **86** (11), pp. 1501–1510 (2006)
- [257] **Holmin, J., and M. Nawrot**, “Aging does not affect integration times for the perception of depth from motion parallax,” *Vision Research*, **140**, pp. 81–88 (2017)
- [258] **Almajid, R., C. Tucker, W.G. Wright, E. Vasudevan, and E. Keshner**, “Visual dependence affects the motor behavior of older adults during the Timed Up and Go (TUG) test,” *Archives of Gerontology and Geriatrics*, **87**, p. 104004 (2020)

- [259] **Bernard-Demanze, L., M. Dumitrescu, P. Jimeno, L. Borel, and M. Lacour**, “Age-Related Changes in Posture Control are Differentially Affected by Postural and Cognitive Task Complexity,” (2009)
- [260] **Patterson, R., M.D. Winterbottom, and B.J. Pierce**, “Perceptual Issues in the Use of Head-Mounted Visual Displays,” *Human Factors*, **48** (3), pp. 555–573 (2006)
- [261] **Franěk, M.**, “Environmental Factors Influencing Pedestrian Walking Speed,” *Perceptual and Motor Skills*, **116** (3), pp. 992–1019 (2013)
- [262] **Dupuy, E.G., and L.M. Decker**, “Influence des stratégies sensorielles sur la régulation de l’équilibre postural chez l’adulte sain,” *Neurophysiologie Clinique*, **48** (6), p. 318 (2018)
- [263] **Spildooren, J., S. Vercruyse, K. Desloovere, W. Vandenberghe, E. Kerckhofs, and A. Nieuwboer**, “Freezing of gait in Parkinson’s disease: The impact of dual-tasking and turning,” *Movement Disorders*, **25** (15), pp. 2563–2570 (2010)
- [264] **Ball, K.K., B.L. Beard, D.L. Roenker, R.L. Miller, and D.S. Griggs**, “Age and visual search: expanding the useful field of view,” *JOSA A*, **5** (12), pp. 2210–2219 (1988)
- [265] **O’Connor, S.M., and J.M. Donelan**, “Fast visual prediction and slow optimization of preferred walking speed,” *Journal of Neurophysiology*, **107** (9), pp. 2549–2559 (2012)
- [266] **De Keersmaecker, E., N. Lefeber, B. Serrien, et al.**, “The Effect of Optic Flow Speed on Active Participation During Robot-Assisted Treadmill Walking in Healthy Adults,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **28** (1), pp. 221–227 (2020)
- [267] **Felnhofer, A., O.D. Kothgassner, L. Beutl, H. Hlavacs, and I. Kryspin-Exner**, “Is Virtual Reality made for Men only? Exploring Gender Differences in the Sense of Presence,” p. 9
- [268] **Almajid, R., and E. Keshner**, “Role of Gender in Dual-Tasking Timed Up and Go Tests: A Cross-Sectional Study,” *Journal of Motor Behavior*, **51** (6), pp. 681–689 (2019)
- [269] **Regenbrecht, H.**, “Faktoren für Präsenz in virtueller Architektur,” 1999. <https://e-pub.uni-weimar.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/33>
- [270] **Waltemate, T., D. Gall, D. Roth, M. Botsch, and M.E. Latoschik**, “The Impact of Avatar Personalization and Immersion on Virtual Body Ownership, Presence, and Emotional Response,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **24** (4), pp. 1643–1652 (2018)
- [271] **Slater, M., and A. Steed**, “A Virtual Presence Counter,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, **9** (5), pp. 413–434 (2000)
- [272] **Jung, S., and C.E. Hughes**, “The Effects of Indirect Real Body Cues of Irrelevant Parts on Virtual Body Ownership and Presence,” *ICAT-EGVE 2016 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments*, p. 8 pages (2016)

- [273] **Tanaka, K., H. Nakanishi, and H. Ishiguro**, “Physical Embodiment Can Produce Robot Operator’s Pseudo Presence,” *Frontiers in ICT*, **2**, (2015)
- [274] **Slater, M., and S. Wilbur**, “A Framework for Immersive Virtual Environments Five: Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments,” *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, **6** (6), pp. 603–616 (1997)
- [275] **Vitaliano, P.P., J. Russo, J.E. Carr, R.D. Maiuro, and J. Becker**, “The Ways of Coping Checklist: Revision and Psychometric Properties,” *Multivariate Behavioral Research*, **20** (1), pp. 3–26 (1985)
- [276] **Muhla, F., F. Clanché, C. Rose, A. Cosson, and G. Gauchard**, “Biomechanical and human behavior assessment using virtual reality to challenge balance and posture for the elderly and patients with Parkinson’s disease,” *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, **20** (sup1), pp. 141–142 (2017)
- [277] **Clanché, F., A. Cosson, F. Muhla, and G. Gauchard**, “Virtual reality-based scenarios for fall preventions,” *Proceedings of the 29th Conference on l’Interaction Homme-Machine - IHM ’17*, ACM Press (2018), 187–197.
- [278] **Kempen, G.I.J.M., L. Yardley, J.C.M. van Haastregt, et al.**, “The Short FES-I: a shortened version of the falls efficacy scale-international to assess fear of falling,” *Age and Ageing*, **37** (1), pp. 45–50 (2008)
- [279] **Yardley, L., N. Beyer, K. Hauer, G. Kempen, C. Piot-Ziegler, and C. Todd**, “Development and initial validation of the Falls Efficacy Scale-International (FES-I),” *Age and Ageing*, **34** (6), pp. 614–619 (2005)
- [280] **Jacobs, J.V., and F.B. Horak**, “Abnormal proprioceptive-motor integration contributes to hypometric postural responses of subjects with Parkinson’s disease,” *Neuroscience*, **141** (2), pp. 999–1009 (2006)
- [281] **Peterson, D.S., and F.B. Horak**, “Neural Control of Walking in People with Parkinsonism,” *Physiology*, **31** (2), pp. 95–107 (2016)
- [282] **Glickstein, M., and J. Stein**, “Paradoxical movement in Parkinson’s disease,” *Trends in Neurosciences*, **14** (11), pp. 480–482 (1991)
- [283] **Azulay, J.-P., S. Mesure, B. Amblard, O. Blin, I. Sangla, and J. Pouget**, “Visual control of locomotion in Parkinson’s disease,” *Brain*, **122** (1), pp. 111–120 (1999)

Annexes

iGroup Presence Questionnaire

Voici plusieurs propositions qui peuvent s'appliquer à l'expérience que vous venez d'avoir. Indiquez, s'il vous plait, si chacune de ces propositions s'applique ou non à votre expérience. Vous pouvez utiliser n'importe quelle graduation. Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse, seule votre opinion est importante.

Vous remarquerez que certaines questions se ressemblent. Ceci est nécessaire pour des raisons statistiques. Rappelez-vous que vous devez répondre à ces questions en vous référant seulement à l'expérience que vous venez juste d'avoir.

A quel point étiez-vous conscient du monde réel environnant alors que vous étiez en train de naviguer dans le monde virtuel ? (par exemple : sons, température de la pièce, présence d'autres gens, etc.) ?

Extrêmement conscient Pas conscient du tout

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Modérément
conscient

Comment le monde virtuel vous a-t-il semblé ?

Complètement réel Pas du tout réel

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

J'ai eu la sensation d'agir dans l'espace virtuel plutôt que d'agir sur un quelconque mécanisme à l'extérieur de celui-ci.

Pas du tout d'accord Complètement d'accord

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

A quel point votre expérience dans l'environnement virtuel vous a-t-elle semblée cohérente avec votre expérience dans le monde réel ?

Pas cohérente Très cohérente

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Modérément
cohérente

A quel point le monde virtuel vous a-t-il semblé réel ?

A peu près aussi réel qu'un monde imaginé Indistinguable du monde réel

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Je ne me suis pas senti présent dans l'espace virtuel.

Pas senti présent

Senti présent

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Je n'étais pas conscient de mon environnement réel.

Pas du tout d'accord

Tout à fait d'accord

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Dans le monde généré par l'ordinateur, j'ai eu le sentiment "d'y être".

Pas du tout

Beaucoup

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

D'une certaine façon, j'ai eu l'impression que le monde virtuel m'entourait.

Pas du tout d'accord

Tout à fait d'accord

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Je me suis senti présent dans l'espace virtuel.

Pas du tout d'accord

Tout à fait d'accord

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Je faisais toujours attention à l'environnement réel.

Pas du tout d'accord

Tout à fait d'accord

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Le monde virtuel semblait plus réaliste que le monde réel.

Pas du tout d'accord

Tout à fait d'accord

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

J'avais l'impression que j'étais juste en train de percevoir des images.

Pas du tout d'accord

Tout à fait d'accord

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

J'étais complètement captivé par le monde virtuel.

Pas du tout d'accord

Tout à fait d'accord

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Valorisation

Publications

- **2017**
F. Muhla, F. Clanché, C. Rose, A. Cosson, et G. Gauchard, « Biomechanical and human behavior assessment using virtual reality to challenge balance and posture for the elderly and patients with Parkinson's disease », *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, vol. 20, n° sup1, p. 141-142, oct. 2017, doi: 10.1080/10255842.2017.1382901.
- **2018**
F. Clanché, A. Cosson, F. Muhla, et G. Gauchard, « Virtual reality-based scenarios for fall preventions », in *Proceedings of the 29th Conference on l'Interaction Homme-Machine - IHM '17*, Poitiers, France, 2018, p. 187-197, doi: 10.1145/3132129.3132148.
- **2020**
Muhla, Frédéric, Clanché, F., Duclos, K., Meyer, P., Maïaux, S., Colnat-Coulbois, S., & Gauchard, G. C. (2020). « Impact of using immersive virtual reality over time and steps in the Timed Up and Go test in elderly people. » *PLOS ONE*, 15(3), e0229594. , doi: 10.1371/journal.pone.0229594

Communications orales

- **Décembre 2017 et 2018**
Présentation orale des avancées du Projet PrévSim au Comex Recherche Hôpital Virtuel de Lorraine.
- **Mars 2018**
Présentation orale des travaux réalisés avec l'OHS Centre Florentin à La Semaine Santé en Lorraine à la Faculté de Médecine de Nancy-Brabois.
- **Octobre 2018**
Présentation orale du projet PrévSim auprès de la DRCI (Délégation à la Recherche Clinique et à l'Innovation) du CHRU de Nancy-Brabois
- **Mars 2019**
Présentation orale de l'étude #2 au Symposium Simulation en Santé et Sport - Recherche, Pédagogie & Innovation ».
- **Septembre 2019**
Présentation orale du projet PrévSim auprès de l'association Cœur et Santé avec la fédération française de Cardiologie à Pont-à-Mousson.
- **Octobre 2019**
Présentation orale des résultats des études #2 et #3 à l'ACAPS de Paris.

Communications écrites

- **Août 2017**
Poster + article méthodologique : au congrès sur l'Interface Homme/Machine (IHM) au Futuroscope de Poitiers.
- **Octobre 2017**
Poster : à l'ACAPS de Dijon.
- **Novembre 2017**
Poster + article méthodologique : au 42ème Congrès de la Société de biomécanique de Reims.
- **Décembre 2017**
Poster : à la 11^{ème} édition de l'INSHS International Christmas Sport Scientific Conference à Szombathely (Hongrie).
- **Janvier 2018**
Poster : à l'inauguration du site Hôpital Virtuel de Lorraine à la Faculté de Médecine de Nancy-Brabois

Participations à des congrès et manifestations scientifiques

- **Décembre 2016**
Participation au congrès PEM à la Faculté de Médecine de Nancy-Brabois.
- **Janvier 2017**
Participation au Workshop Ecotech à la Pitié Salpêtrière à Paris.
- **Mai 2018**
Participation au Workshop Virtual Twin à l'UFR MIM (Mathématiques, Informatique et Mécanique) de Metz.
- **Juin 2019**
Participation à la journée de la recherche à l'Institut de Formation en Masso Kinésithérapie (IFMK) de Nancy.

Participations à des salons

- **Mars 2017, 2018 et 2019**
Présentation de matériel de mesure et de réalité virtuelle auprès d'un public de professionnels et de civils aux Salons Cité Santé de Nancy.
- **Mars 2018**
Présentation de matériel de mesure et de réalité virtuelle à La Semaine Santé en Lorraine à la Faculté de Médecine de Nancy-Brabois.

- **Avril 2018**
Animation d'un stand de présentation de matériel de mesure au Workshop MIM avec le laboratoire Ditek dans le cadre des robot collaboratifs à l'UFR MIM (Mathématiques, Informatique et Mécanique) de Metz.
- **Octobre 2018**
Animation d'un stand de présentation du matériel de mesure dans le cadre des robots collaboratifs au salon La Fête de la Science à Villers-lès-Nancy.
- **Octobre 2018**
Animation d'un stand de présentation du matériel de réalité virtuelle auprès de professionnels dans le cadre de l'ergonomie au travail des personnes en situation de handicap à Epinal.
- **Juin 2019**
Participation au Salon Grand E-nov de Strasbourg
- **Juin 2019**
Animation d'un stand de réalité virtuelle à la Journée de l'ONPA (Office Nancéien des Personnes Âgées) à Nancy.
- **Décembre 2019**
Présentation des outils de métrologie et vulgarisation scientifique auprès de lycéens au CREPS de Nancy

Formations

- **Mars 2017**
Encadrement éthique et législatif de la recherche
- **Juin 2017**
Formation à la culture de prévention
- **Septembre - Décembre 2017**
Formation Master II Langues de Signe Française (LSF)
- **Mai 2018**
« Initiation aux Bonnes Pratiques Cliniques en investigation clinique - ICH E6(R2) GCP »
- **Novembre 2018**
DCCE Innovations pédagogiques et outils numériques
- **Janvier 2019**
Projet pédagogique tuteuré