

Apport des modalités vibratoires pour la navigation en environnement virtuel

Jérémy Plouzeau

▶ **To cite this version:**

Jérémy Plouzeau. Apport des modalités vibratoires pour la navigation en environnement virtuel. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2016. Français. NNT : 2016ENAM0046 . tel-01455079

HAL Id: tel-01455079
https://pastel.hal.science/tel-01455079

Submitted on 3 Feb 2017

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.

2016-ENAM-0046



École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Informatique et traitement du signal "

présentée et soutenue publiquement par

Jérémy PLOUZEAU

Le 2 décembre 2016

Apport des modalités vibratoires pour la navigation en environnement virtuel

Directeur de thèse : **Frédéric MERIENNE**
Co-encadrement de la thèse : **Damien PAILLOT**

Jury

M. Anatole LECUYER, Directeur de recherche, INRIA	Président
M. Daniel MESTRE, Directeur de recherche, CNRS, Université de la Méditerranée	Rapporteur
M. Pablo FIGUEROA, Professeur, Université Los Andes	Rapporteur
Mme. Yaoping HU, Professeur, Université de Calgary	Examinateur
M. Damien PAILLOT, Maître de conférences, Le2i, Université de Bourgogne	Examinateur
M. Frédéric MERIENNE, Professeur, Le2i, Arts et Métiers	Examinateur
M. Andras KEMENY, Professeur associé, directeur du LIV, CRVSI, Renault	Invité

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Campus de Cluny
Institut Image - Le2i

Remerciements

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé pendant l'élaboration de ma thèse et notamment mon directeur de thèse, M. Frédéric Merienne ainsi que mon co-encradrant, M. Damien Paillot. Ils ont toujours été présent et m'ont apporté soutiens et conseils lors de ce travail.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien de la région Bourgogne et leur programme Jeune Chercheur Entrepreneur (JCE), qui m'a permis, grâce à une allocation de recherches et diverses aides financières, de me consacrer sereinement à l'élaboration de ma thèse.

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans la disponibilité et les conseils que m'ont apportés les différents collaborateurs de l'Institut Image : Géraldine, Julien, Sebastien, Thomas, Remy, Jean-Remy, Christophe, Jean-Luc, Ruding et Olivier. De même je souhaite remercier les doctorants pour leurs conseils et leur soutien : Chakib, Bo, Baris, Ali, Liza et José-Louis. Je remercie Thierry GIANNARELLI pour m'avoir fait découvrir les vibrations proprioceptives et leur capacité d'illusion de mouvement.

Au terme de ce parcours, je remercie enfin celles et ceux qui me sont chers, Leurs attentions et encouragements m'ont accompagnée tout au long de ces années. Je suis redevable à mes parents pour leur soutien moral et matériel et leur confiance indéfectible dans mes choix. Je remercie aussi mes amis pour leur présence et leurs encouragements durant ces années.

Table des matières

Chapitre 1 - Contexte 1

1. Introduction 1

2. Etat de l'art 2

2.1. La réalité virtuelle 2

2.1.1. Définition 2

2.1.2. Utilisation 5

2.1.3. Dispositif 6

2.2. La présence 9

2.2.1. Définition 9

2.2.2. Paramètres mis en jeu 11

2.2.3. Mesures subjectives 13

2.2.4. Mesures Objectives 13

2.3. Le mal du simulateur 13

2.3.1. Définition 13

2.3.2. Paramètres mis en jeu 15

2.3.3. Mesures subjectives 15

2.3.4. Mesures Objectives 17

2.4. La navigation 17

2.4.1. Way finding et déplacement 18

2.4.2. Interaction pour la navigation 18

2.5. Vibration 19

2.6. La proprioception 19

2.6.1. La marche et l'illusion proprioceptive 20

2.7. Vibrations pour l'aide à la navigation 24

2.7.1. Simulateur de conduite 24

2.7.2. Simulation de la texture du sol 25

2.7.3. Vibrations relatives au déplacement....25
2.7.4. Orientation....26
Chapitre 2 - Méthodologie....27
1. Axe de recherche....27
2. Navigation....28
2.1. Cognition de la navigation....29
2.1.1. Les points de repères....29
2.1.2. La carte mentale....29
2.1.3. Amélioration continue....30
2.2. Action de navigation....30
2.2.1. Classifications....30
2.2.2. Exemples d'interactions et métaphores....32
2.3. Interactions développées pour répondre à la question de recherche....39
2.3.1. Simulateur de conduite....39
2.3.2. Contrôle FP en Vitesse....40
2.3.3. Butterfly Navigation....41
Chapitre 3 - Expérimentations....44
1. Vibrations relatives à l'action de la navigation....44
1.1. Simulation de conduite....44
1.1.1. Simulation de bandes rugueuses....44
1.1.2. Expérimentation....47
1.2. Vibrations pour le déplacement et simulation de marche....53
1.2.1. Modalités vibratoires....54
1.2.2. Expérimentations....59
1.3. Conclusion relative aux vibrations concernant la partie action de la navigation....90
2. Vibrations relatives à la cognition de la navigation....90
2.1. Langages vibratoire....91
2.1.1. Matériel....91

2.1.2. « Pushing pattern »....92
2.1.3. « Compass pattern »....93
2.2. Expérimentation....95
2.2.1. Scénario....95
2.2.2. Installation et protocole expérimental....96
2.2.3. Résultats et analyses....98
2.3. Conclusion....101
Chapitre 4 - Conclusion....102
1. Conclusion....102
1.1. Synthèse....102
1.2. Perspectives....103
Références....105
Annexes....A
Questionnaire de propension à l'immersion (QPI)....A
Questionnaire sur l'état de présence (QEP)....E
Questionnaire sur les cybermalaises....K

Liste des figures

Figure 1 : Le sensorama en action (http://www.telepresence.org) 2

Figure 2 : L'espace Autonomie, Interaction, Présence [7] 4

Figure 3 : Simulateur de conduite statique Eco² 7

Figure 4 : Simulateur de conduite dynamique SAAM/Ultimate Renault 8

Figure 5 : Visiocasque Oculus Rift / mur d'images 3D pour la recherche nucléaire - (c) P. Stroppa / CEA 8

Figure 6 : Le CAVE 4 faces à l'Institut Image 8

Figure 7 : Les trois pôles de la présence [18] 10

Figure 8 : Interaction entre les différents modes de présence [22] 12

Figure 9: Fibres neuromusculaires (http://www.bioposturalsystem.it) 20

Figure 10 : Les trois plans de référence et six directions fondamentales du corps humain par rapport à la position anatomique [70]. 22

Figure 11: Représentation du cycle de marche d'après Viel [71] 23

Figure 12 : Représentation du cycle de marche d'après Whittle [70] 24

Figure 13 : Catégories d'interactions pour la navigation 31

Figure 14 : Différentes méthodes de navigation réparties suivant notre classification 32

Figure 15 : Différentes techniques de marche redirigée [86] 33

Figure 16 : Marche sur place avec WizDish ROVR VR locomotion platform 33

Figure 17 : Courbe des relations de distance réelle virtuelle pour les interactions de type "GoGo" [97] 34

Figure 18 : Gauche : Manette Hydra de Razer / Droite : Vue à la première personne avec la déformation des lentilles de l'Oculus Rift 35

Figure 19 : Flystick 36

Figure 20 : Navigation par pointage avec les différents paramètres [98] 37

Figure 21 : Compagnon virtuel dans différentes conditions [99] 38

Figure 22 : Simulateur Automobile Arts et Métiers (SAAM) 40

Figure 23 : Correspondance entre vitesse de déplacement et position du joystick (Contrôle FP en Vitesse) 40

Figure 24 : Correspondance entre vitesse de rotation et position du joystick (Contrôle FP en Vitesse) 41

Figure 25 : Papillon comme compagnon virtuel 42

Figure 26 : Evolution de la vitesse lors d'une accélération suivie d'un arrêt 42

Figure 27 : Evolution de la vitesse et de la position du papillon et de l'avatar au cours du temps lors d'une accélération puis d'un arrêt 43

Figure 28 : Eléments vibrants pour la simulation de conduite 44

Figure 29 : Gauche : Bandes rugueuses longitudinales / Droite : Bandes rugueuses transversales 46

Figure 30 : Placement des bandes rugueuses transversales [103] [104]. 47

Figure 31 : Bandes rugueuses positionnées avant la dernière intersection 48

Figure 32 : Haut gauche : Position moyenne de la pédale d'accélération / Haut droit : Effort moyen sur la pédale de frein / Bas gauche : Vitesse moyenne de la voiture / Bas droit : Accélération moyenne de la voiture 51

Figure 33 : Anatomie postérieure de la jambe 54

Figure 34 : Schéma de commande des moteurs pour les vibrations proprioceptives 55

Figure 35 : Courbes caractéristiques des moteurs Uni Vibe 345-002 55

Figure 36 : Dispositif de vibrations proprioceptives 56

Figure 37 : Vibrotac et positionnement des bracelets sur les chevilles 57

Figure 38 : Correspondance entre cadence et vitesse de marche adaptée des travaux d'Hirasaki 58

Figure 39: Parcours dans le parc 60

Figure 40 : Slalom 61

Figure 41 : Moyennes des scores de présence globale pour chaque modalité 70

Figure 42 : Scores des différents paramètres du sentiment de présence 71

Figure 43 : Moyennes des scores du questionnaire sur le mal du simulateur 72

Figure 44 : Résultats des moyennes d'écart de surface de stabilité 73

Figure 45 : Résultats moyens des indices de performance de navigation 74

Figure 46 : Bracelet E4 d'Empatica 77

Figure 47 : Moyenne de la présence totale 86

Figure 48 : Score des sous-échelles de présence.....87

Figure 49 : Moyenne des scores du questionnaire sur le mal du simulateur.....87

Figure 50 : Gauche – Indice moyen de mal du simulateur obtenu avec les mesure de conductivité de la peau / Droite - Résultats des moyennes d'écart de surface de stabilité (mm^2) 88

Figure 51 : Résultats moyens des indices de performances de navigation.....89

Figure 52 : les deux bracelets VibroTac 91

Figure 53 : Schéma indiquant une rotation avec le "Pushing pattern".....92

Figure 54 : Principe du "Compass pattern".....94

Figure 55 : Intensité d'activation des moteurs en fonction de l'angle 94

Figure 56 : Exemple de parcours invisible à suivre.....96

Figure 57 : Installation expérimentale.....97

Figure 58 : Surface entre la trajectoire théorique et la trajectoire réalisée 99

Figure 59 : Temps de réalisation du parcours 99

Figure 60 : Chemin pour calculer la précision de suivi.....100

Figure 61 : Indice de performance de navigation.....101

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats de la position de la pédale d'accélération et d'effort sur le frein pour la simulation sans les bandes rugueuses.....49

Tableau 2 : Résultats de la vitesse et de l'accélération de la voiture pour la simulation sans les bandes rugueuses.....49

Tableau 3 : Résultats de la position de la pédale d'accélération et d'effort sur le frein pour la simulation avec les bandes rugueuses.....50

Tableau 4 : Résultats de la vitesse et de l'accélération de la voiture pour la simulation avec les bandes rugueuses.....50

Tableau 5 : Résultats du questionnaire sur la perception de l'annonce des intersections sans les bandes rugueuses.....52

Tableau 6 : Résultats du questionnaire sur la perception de l'annonce des intersections avec les bandes rugueuses.....52

Tableau 7 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Présence totale.....63

Tableau 8 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous échelle Réalisme ...64

Tableau 9 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous échelle Possibilité d'Agir 64

Tableau 10 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous échelle Qualité de l'Interface 65

Tableau 11 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous Echelle Auto-Evaluation de la Performance 65

Tableau 12 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous échelle Auditif 66

Tableau 13 : Résultats du Questionnaire sur le Mal du Simulateur / Total.....66

Tableau 14 : Résultats du Questionnaire sur le Mal du Simulateur / Sous échelle Nausée 67

Tableau 15 : Résultats du Questionnaire sur le Mal du Simulateur / Sous échelle Oculo-moteur.....67

Tableau 16 : Résultats des écarts de stabilité avant et après simulation en mm².....68

Tableau 17 : Résultats du temps de réalisation du slalom en secondes.....68

Tableau 18 : Résultats des surfaces entre trajectoire de référence et trajectoire réalisée en m² 69

Tableau 19 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Présence totale.....78

Tableau 20 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous-échelle Réalisme .79

Tableau 21 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous-échelle Possibilité d'Agir.....79

Tableau 22 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous-échelle Qualité de l'Interface 80

Tableau 23 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous-échelle Possibilité d'Agir.....80

Tableau 24 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous-Echelle Auto-Evaluation de la Performance 81

Tableau 25 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous-échelle Auditif 81

Tableau 26 : Résultats du Questionnaire sur le Mal du Simulateur / Total.....82

Tableau 27 : Résultats du Questionnaire sur le Mal du Simulateur / Sous-échelle Nausée 82

Tableau 28 : Résultats du Questionnaire sur le Mal du Simulateur / Sous-échelle Oculo-moteur.....83

Tableau 29 : Résultat de la mesure de la conductance de la peau.....84

Tableau 30 : Résultats des écarts de stabilité avant et après simulation en mm² 84

Tableau 31 : Résultats des temps de réalisation du slalom en secondes 85

Tableau 32 : Résultats des surfaces entre trajectoire de référence et trajectoire réalisée en m² 85

Chapitre 1 - Contexte

1. Introduction

« Le premier objectif de la réalité virtuelle (indépendamment de la présence) est déjà élevé : simuler un environnement complexe et le restituer aux sens de l'utilisateur. Aussi, nous avons conscience qu'en définissant la réalité virtuelle par la présence nous proposons un défi supplémentaire à relever. C'est pourquoi nous avons coutume de dire que nous cherchons à tendre vers la présence plutôt qu'un ambitieux atteindre la présence. »

Bouvier

Les objectifs de la réalité virtuelle sont multiples. Elle a pour but d'immerger l'utilisateur dans un monde virtuel lui permettant de réaliser des actions naturellement et en sécurité. Elle permet de tester de nouveaux systèmes afin d'en prédire les défauts avant même la construction d'un prototype. L'atout majeur de la réalité virtuelle est de pouvoir explorer un monde virtuel infini dans un espace restreint. Cet atout est aussi la source du problème majeur de la réalité virtuelle, le mal du simulateur. Une application de réalité virtuelle étant multimodale, il est intéressant de se demander s'il est possible d'ajouter une nouvelle dimension à ces applications afin de diminuer le mal du simulateur dû à la navigation ; et permettre par la même occasion d'améliorer le sentiment de présence ressenti par les utilisateurs. L'objectif de ce travail de recherche est alors de déterminer quel serait l'impact sur la simulation de l'apport des modalités vibratoires pour l'aide à la navigation dans un environnement virtuel.

La question suivante se pose alors :

Quel est l'impact de l'ajout de retours vibratoires sur la présence et le mal du simulateur lors de navigation en environnement virtuel ?

Ce travail de recherche a pour objectif d'explorer différents aspects vibratoires pour différentes méthodes de navigation.

Ce premier chapitre dressera un état de l'art permettant d'éclairer les différents points relatifs à cette problématique. Ainsi, dans une première partie, les différents aspects de la réalité virtuelle seront étudiés, pour ensuite expliquer ce qu'est la présence dans le monde virtuel

ainsi que le mal du simulateur. Nous allons par la suite pouvoir donner une définition de la navigation et en exprimer les différents principes. Nous pourrons alors définir ce que sont les vibrations et en donner leurs utilisations dans les applications de réalité virtuelle. Enfin, nous nous attarderons sur l'aspect de la proprioception.

2. Etat de l'art

2.1. La réalité virtuelle

2.1.1. Définition

Avant même que le terme de réalité virtuelle apparaisse, Morton Heilig crée en 1962 le Sensorama (Figure 1). On peut considérer le sensorama comme le premier système de réalité virtuelle. Il avait pour but de simuler une balade à moto dans Brooklyn. Le sensorama était constitué d'un écran stéréoscopique grand angle, d'un son spatialisé, d'un siège vibrant, d'un ventilateur et d'un diffuseur d'odeur. [1]



Figure 1 : Le sensorama en action (http://www.telepresence.org)

Suite à ces travaux, Sutherland conçoit le premier visiocasque en 1965. Celui-ci est surnommé l'épée de Damoclès car il doit être accroché au plafond en raison du poids des tubes cathodiques le constituant. Il est considéré comme une fenêtre sur le monde virtuel, cependant il ne permet pas une vision stéréoscopique. [2]

Le terme Virtual Reality est utilisé la première fois en 1989 par Jaron Lanier sur le salon Texpo. Il l'utilise comme un terme marketing pour promouvoir des gants Dataglove et des visiocasques EyePhones. [3].

Il existe plusieurs définitions de la réalité virtuelle. « Immersion, Interaction et Imagination » est une définition donnée par Burdea et Coiffet [4]. L'Immersion et l'Interaction sont considérées comme conditions obligatoires pour définir une application comme une application de réalité virtuelle. En revanche l'Imagination est critiquée par Fuchs et al. [5]. Ainsi la réalité virtuelle correspondrait pour lui à des stimulations sensorielles et des outils d'interactions.

Ellis [6] préfère utiliser le terme d'« environnement virtuel » plutôt que « réalité virtuelle ». Voici sa définition :

> *Les environnements virtuels sont des images virtuelles interactives améliorées par des processus particuliers et complétées par des restitutions provenant d'autres modalités telles que le son et l'haptique et ce pour convaincre les utilisateurs qu'ils sont immergés dans un espace synthétique.*

Dans cette définition, les aspects cognitifs et humains ne sont pas pris en compte contrairement à l'aspect sensoriel basé essentiellement sur le retour visuel.

Le point de vue suivant [7] est très intéressant car il décrit la réalité virtuelle comme un composé d'autonomie, d'interaction et de présence. L'autonomie désigne le comportement des entités virtuelles présentes dans l'environnement virtuel. L'interaction pointe la capacité d'interagir avec ces entités et l'environnement. La présence est ici associée à la stimulation sensorielle. Comme la Figure 2 le montre, à eux trois ils composent les trois dimensions définissant l'espace des environnements virtuels.

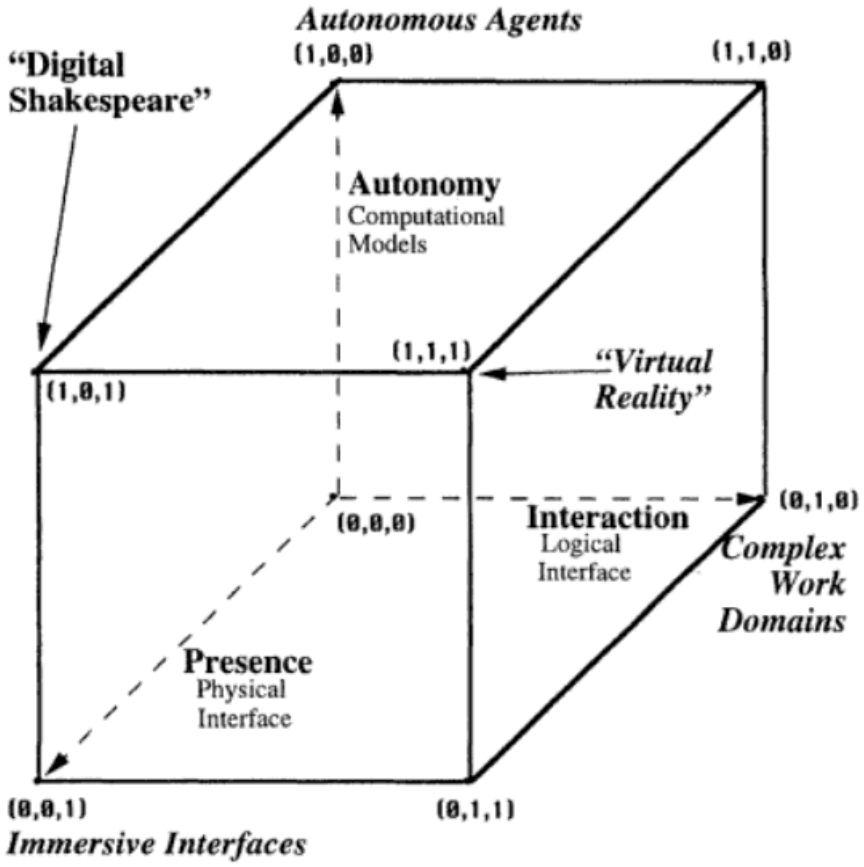


Figure 2 : L'espace Autonomie, Interaction, Présence [7]

En 2003 Fuchs et al. [5] précisent la finalité de la réalité virtuelle :

> *La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel.*

De même ils [5] proposent une définition fonctionnelle de la réalité virtuelle :

> *La réalité virtuelle va permettre à l'homme de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de temps, de lieu et(ou) de type d'interaction : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique.*

Et Arnaldi et al [5] en proposent une définition technique :

> *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.

La définition technique permet de décrire avec efficacité les fonctionnalités d'un dispositif de réalité virtuelle. L'énoncé de la finalité et la définition fonctionnelle sont, elles, plus axées sur l'expérience dans le monde artificiel créé.

Ces définitions rejoignent le point de vue de Slater [8] qui voit la réalité virtuelle comme le moyen de transporter l'utilisateur dans un autre monde que celui où il se trouve à l'aide de moyens immersifs permettant de stimuler les différents sens.

2.1.2. Utilisation

De par sa définition, la réalité virtuelle est un domaine ayant un large panel de domaines d'utilisation. En effet, le premier objectif de la réalité virtuelle est de simuler un environnement complexe et de le restituer aux sens de l'utilisateur. Avec les technologies actuelles cet environnement peut être infini et de complexité immense. La réalité virtuelle permet ainsi d'exposer l'utilisateur à toutes sortes de situations, des plus banales aux plus dangereuses. La réalité virtuelle donne alors l'avantage de mettre l'utilisateur en présence des dangers sans les risques qui peuvent en découler, évitant ainsi les inconvénients que peuvent représenter les situations dangereuses. C'est pourquoi, les avantages de la réalité virtuelle font qu'elle est utilisée dans de nombreux domaines. Le volume 4 du traité de la réalité virtuelle [9] en dresse une liste dont voici quelques exemples suivant les domaines d'activité.

i. Réalité virtuelle et conception

Lors de la phase de conception d'un produit, il est nécessaire d'en avoir une représentation virtuelle. De ce fait, la réalité virtuelle permet une représentation du produit avec laquelle il est possible d'interagir. Elle permet ainsi de réduire les coûts de conception car il n'est plus nécessaire de produire des prototypes. De même elle permet de nouvelles méthodes de conception.

La réalité virtuelle permet aussi aux constructeurs automobiles tels que PSA Peugeot Citroën ou Renault de visualiser leurs nouveaux véhicules à l'échelle 1 pour interagir avec eux, et faire différentes analyses (aérodynamisme, ergonomie, design,…).

La possibilité d'interagir à plusieurs en même temps avec différents dispositifs permet aussi une nouvelle approche de la conception collaborative, chaque intervenant possède son point de vue avec les métadonnées qui sont propres à son corps de métier. Les intervenants peuvent ainsi interagir directement ensemble afin d'optimiser la conception du système.

Les nouveaux dispositifs d'interaction et de visualisation permettent une nouvelle approche de conception et permettent de développer de nouveaux systèmes avec des fonctionnalités et designs innovants.

ii. Réalité virtuelle et santé

Les dispositifs de réalité virtuelle permettant de stimuler les sens d'une personne sont utilisés dans le domaine de la santé. Dans ce domaine, la réalité virtuelle est utilisée de différentes façons. Elle permet l'analyse de mouvements dans le but de réaliser de la rééducation comme dans le projet ANR SIMACTION [10]. De même la réalité virtuelle peut aider les sportifs à travailler leurs gestes techniques.

La réalité virtuelle permet aussi la formation de chirurgiens pour le maniement d'endoscopes par exemple [11].

Le domaine de la psychologie utilise aussi la réalité virtuelle pour tout ce qui concerne les troubles comportementaux et phobies. Elle permet de mettre le patient en situation sans lui faire prendre de risque.

Il est également possible d'utiliser la réalité virtuelle comme une interface de jeu pour rendre ludiques les phases de traitement de certaines maladies [12]. A l'hôpital de Washington, au moment des soins prodigués aux grands brûlés, ceux-ci mettent un casque et entrent dans un décor de glace, de canyons gelés, de banquises. Il leur est même possible de jouer avec un logiciel appelé « SnowWorld », en tirant des boules de neige sur les bonhommes de neige, les igloos ou les pingouins. Cela leur permet de concentrer leur attention sur autre chose que la douleur ce qui a pour effet de soulager la douleur ressentie de façon plus efficace que la morphine.

iii. Réalité virtuelle, architecture et patrimoine

La réalité virtuelle permet la visualisation de bâtiments modélisés à l'échelle 1 avant de commencer les travaux de construction. Cela permet de donner une idée aux utilisateurs de ce que va rendre le bâtiment une fois construit. [13]

Bien entendu, ce n'est pas une liste exhaustive, il existe beaucoup d'autres applications de la réalité virtuelle qui vont du serious gaming jusqu'à la visualisation de données scientifiques.

2.1.3. Dispositif

Chaque utilisation de la réalité virtuelle implique un choix au niveau du matériel utilisé. En effet, en fonction des attentes, il faudrait choisir entre différents systèmes. Les paramètres

rentrant en jeu sont les suivants : quels sens veut-on stimuler, que veut-on modéliser et surtout quel budget a-t-on.

Si l'objectif de la simulation est de réaliser une simulation de pilotage d'un prototype, il existe des simulateurs de conduite. Ces simulateurs peuvent représenter tous types de véhicule (train, voiture, avion, hélicoptère, …). Ils peuvent être statiques ou bien dynamiques avec plus ou moins de degrés de liberté.

Ainsi le système minimal pour la simulation de conduite peut être un simple écran et un volant de jeu vidéo. Un système plus évolué comme les systèmes Eco² (Figure 3) permettent, tout en restant statique, une immersion plus importante avec leurs trois écrans et un poste de conduite complet (volant, siège, levier de vitesse, pédales).



Figure 3 : Simulateur de conduite statique Eco²

A côté de ceux-ci, il existe des systèmes comme le Simulateur Automobile Arts et Métiers, SAAM, (Figure 4 gauche) qui permettent de réaliser des simulations de conduite dynamique avec 6 degrés de liberté mais avec toutefois des translations plutôt restreintes. L'Ultimate (Figure 4 droite) de Renault permet de réaliser des translations plus importantes.



Figure 4 : Simulateur de conduite dynamique SAAM/Ultimate Renault

En revanche si l'objectif de la simulation est l'immersion et l'interaction avec un sujet, le système de réalité virtuelle est différent. Dans ce cas, on peut opter pour l'utilisation d'un visiocasque (Figure 5 Gauche), d'un mur (Figure 5 Droite) ou même d'un CAVE (Figure 6). Le choix entre ces différents systèmes se fait suivant ce qu'on souhaite réaliser et le budget disponible. Un CAVE et un casque permettent un retour visuel omnidirectionnel et une vision stéréoscopique, et s'ils sont équipés d'un système audio performant, ils peuvent fournir un son spatialisé, ce qui fait de ces systèmes de très bons dispositifs de réalité virtuelle.



Figure 5 : Visiocasque Oculus Rift / mur d'images 3D pour la recherche nucléaire - (c) P. Stroppa / CEA

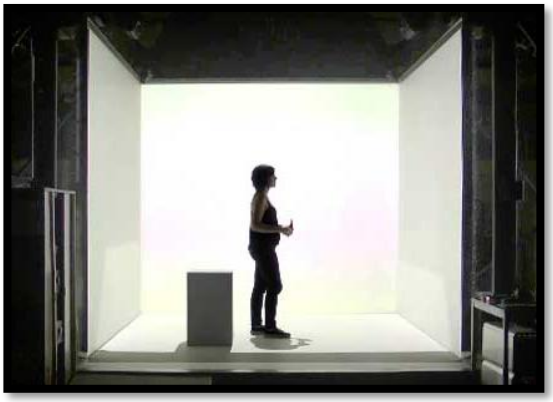


Figure 6 : Le CAVE 4 faces à l'Institut Image

Quel que soit le système utilisé, il aura pour objectif de stimuler les sens de l'utilisateur. Il est nécessaire de stimuler plusieurs sens pour réaliser un bon système de réalité virtuelle, on qualifie donc ces systèmes de multimodaux.

2.2. La présence

Après avoir vu ce qu'est la réalité virtuelle et ses implications, on peut se pencher sur le principe de présence et le mal du simulateur, qui sont deux aspects non négligeables de la réalité virtuelle.

2.2.1. Définition

Définir ce qu'est la présence est très délicat. En effet, comme le remarque Kalawsky [14] :

> *La présence est un paramètre multidimensionnel que l'on peut qualifier de concept-parapluie regroupant un grand nombre de facteurs perceptifs et psychologiques interreliés.*

Il est donc intéressant d'observer les différentes définitions de la présence de ces dernières années. Il existe trois approches différentes. La première est centrée sur une approche technologique, la présence est majoritairement le fruit d'excitations sensorielles. La seconde, plus psychologique, est centrée sur l'humain. La présence est alors considérée comme un état psychologique engendré par l'esprit humain. Les aspects technologiques apparaissent alors secondaires. La troisième voit la présence comme un principe où les actions réalisées par l'utilisateur sont naturelles.

i. Approche technologique

Dans cette approche, la présence résulte de la technologie mise en œuvre. Ainsi on peut quantifier la présence d'un système par sa multi-sensorialité. Plus le système possède des dispositifs technologiques avancés, plus il permettra la présence de l'utilisateur lors de simulations.

ii. Télé-présence

En 1980, Minsky [15] évoque le concept de télé-présence. Cela fait référence à ce que ressent un opérateur lors d'une télé-opération. Les caméras et la machine deviennent alors la matérialisation du corps de l'opérateur qui se retrouve donc projeté sur le lieu de travail de la machine.

Plus tard Sheridan [16] fait la distinction entre « virtual presence » et « tele-présence ». « Virtual presence » désigne alors le sentiment de présence que l'utilisateur ressent dans les

environnements virtuels tandis que la « tele-présence » ne s'applique que pour les opérations à distance, ce qui n'est pas le cas de toutes les applications de réalité virtuelle.

iii. Etre là

La présence peut être assimilée au sentiment d'être là comme le propose Slater et Usoh [17]:

> *L'utilisateur est ailleurs que là où il est physiquement, le "ailleurs" est formé par les images, sons et sensations physiques fournis aux sens de l'utilisateur par le système générant l'environnement virtuel.*

Ainsi la présence revient à se sentir là dans l'environnement virtuel. Le concept d'être là est donc associé à la perception sensorielle. L'utilisateur construit une représentation mentale de l'environnement virtuel grâce aux stimuli de la simulation.

Cette définition de la présence est très intéressante mais elle ne prend pas en compte le rôle de l'action et l'aspect psychologique.

iv. Approche psychologique

Biocca [18] présente l'approche psychologique de la présence avec le paradoxe du livre. En effet, comment expliquer la présence ressentie lors de la lecture d'un livre si l'origine de la présence n'est basée que sur la stimulation des sens. Ainsi la présence ressentie dépendrait de l'environnement perçu qui se déplacerait entre les pôles suivants : physique, virtuel et imaginaire. L'imagination a donc un rôle important dans la présence.

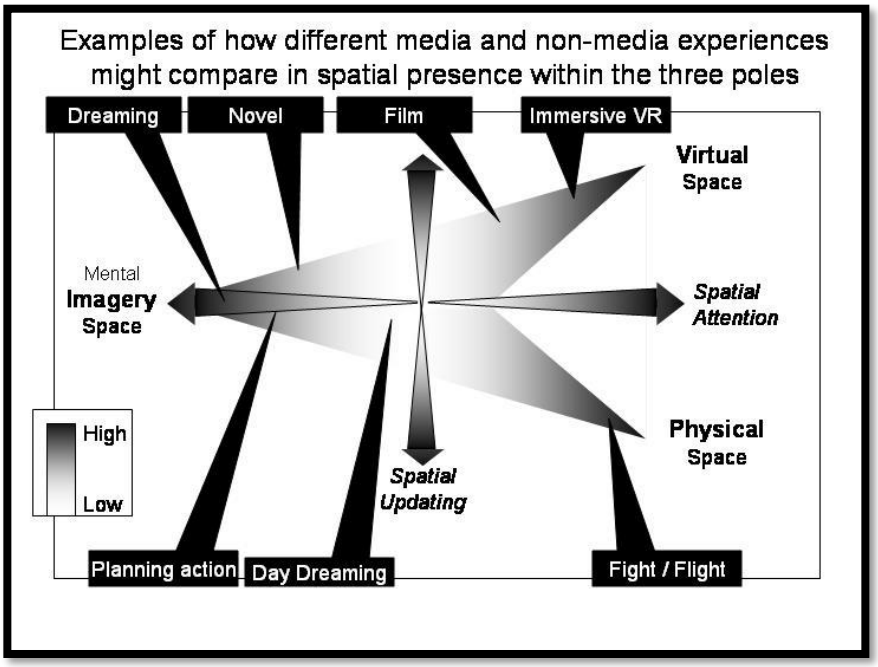


Figure 7 : Les trois pôles de la présence [18]

Schubert et Crusius [19] proposent une définition de la présence qui allie les approches technologique et psychologique. Ils décrivent la présence comme ne dépendant pas directement de l'immersion mais plutôt comme le fruit d'une représentation cognitive de l'environnement construite à partir des stimulations sensorielles. Ainsi la présence dépend de la qualité des systèmes utilisés mais aussi de la capacité d'imagination de l'utilisateur.

v. Approche écologique

Cette approche est basée sur les affordances de Gibson [20]. Les affordances remplacent la représentation mentale de l'environnement ou d'un objet découlant de la perception. Et ainsi comme le proposent Zahorik et Jenison [21], *la présence est équivalente à entreprendre avec succès des actions dans l'environnement*. Si je peux agir dans cet environnement, c'est que j'existe dans celui-ci.

La définition de la présence que nous retenons pour notre étude sera celle utilisée par Bouvier [22] qui décrit la présence comme :

> *Le sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où notre corps se trouve.*

Cette définition permet d'accorder de l'importance aux trois approches vues précédemment. Ainsi l'importance de la technologie et des interactions est associée à une dimension cognitive.

2.2.2. Paramètres mis en jeu

D'après cette définition, si on souhaite un état de présence important de l'utilisateur, la simulation doit être capable de faire correspondre les actions de l'utilisateur à des affordances perçues et assumées par les schémas d'interaction. De même, ces schémas doivent être naturels pour que les sensations proprioceptives du soi virtuel correspondent à celles du soi réel. Enfin, le lien de causalité doit être maintenu entre une action de l'utilisateur et sa perception de la réponse du système [22].

Comme le montre la Figure 8, la présence peut être examinée au travers de ces quatre composantes : présence environnementale, présence sociale, présence de soi et présence d'action. Ces quatre composantes reposant sur les piliers de la réalité virtuelle, eux-mêmes bâtis sur le socle cognitif.

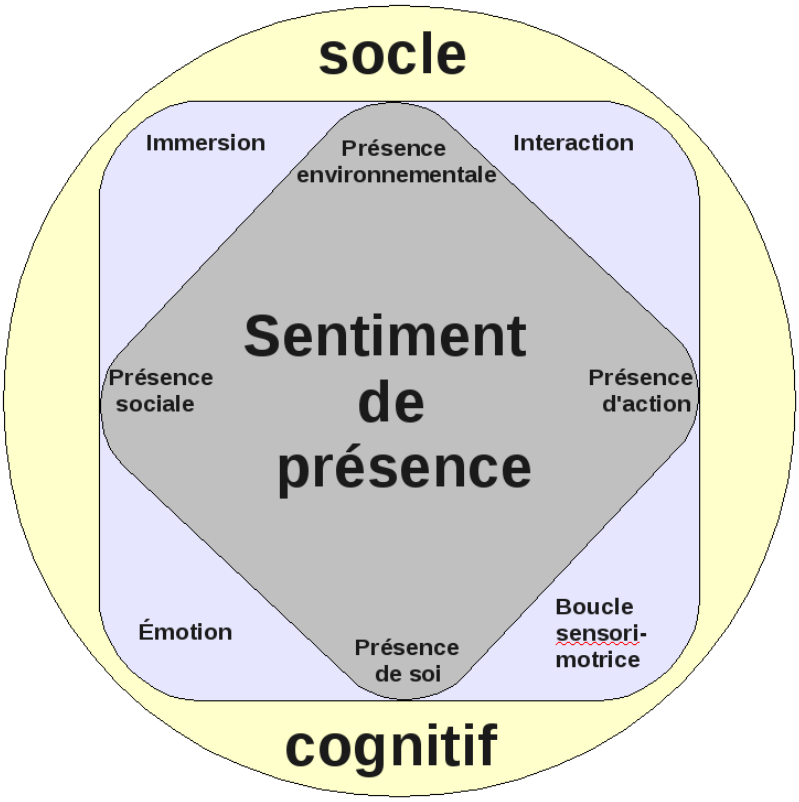


Figure 8 : Interaction entre les différents modes de présence [22]

Ainsi, l'état de présence environnementale est tiré de l'immersion mais aussi de l'émotion. En effet, l'immersion permet de restituer l'environnement virtuel mais si cet environnement est neutre esthétiquement, la présence est moins forte [22].

La présence d'action dépend surtout de la boucle sensorimotrice mais aussi de l'immersion et de la qualité des interactions. C'est l'ensemble de ces trois piliers qui fait que la présence d'action est importante. Les interactions doivent être le plus naturelles possible et directes. De même une action doit être reliée correctement à une réponse du système [22].

L'immersion et la boucle sensorimotrice sont les paramètres composant la présence de soi. Une action engendrant un retour sensoriel permet à l'utilisateur de se sentir existant dans le monde virtuel, et encore plus si ces actions ont un impact dans le monde virtuel [22].

Enfin, la présence sociale est dictée par l'interaction, car c'est ce qui définit la capacité d'interagir avec le monde virtuel et ses acteurs, et l'immersion, car c'est par le biais de ce pilier que sont permis les retours sonore et visuel. De même l'émotion joue un rôle important dans la présence sociale car cela rend la simulation plus humaine [22].

2.2.3. Mesures subjectives

Afin d'évaluer la présence, il est nécessaire d'utiliser un moyen de mesure subjectif. Nous utilisons donc les questionnaires suivants issus des travaux du laboratoire de l'UQO :

- QUESTIONNAIRE SUR LA PROPENSION À L'IMMERSION (QPI)
- QUESTIONNAIRE SUR L'ÉTAT DE PRÉSENCE (QEP)

Ces questionnaires ont pour objectifs d'évaluer la capacité d'une personne à être sensible à la présence et d'évaluer l'état de présence de cette personne. Avec ces deux valeurs, on est alors capable de définir un niveau de présence relatif à l'application [23] [24] [25].

Le QPI est constitué de 18 questions, utilisant une échelle de Likert à 7 niveaux, réparties sur 4 sous-échelles, Focus, Implication, Emotions, Jeu.

De même le QEP est constitué de 24 questions, utilisant une échelle de Likert à 7 niveaux, réparties sur 7 sous-échelles, Réalisme, Possibilité d'agir, Qualité d'interface, Possibilité d'examiner, Auto-évaluation de la performance, Auditif, Haptique.

Pour les deux questionnaires, on additionne par échelle les résultats donnés par les participants. La somme finale permet de noter la capacité d'une application à permettre un sentiment de présence à l'utilisateur.

2.2.4. Mesures Objectives

Comme la présence est un sentiment subjectif, elle est souvent mesurée à l'aide de questionnaires. De nombreux chercheurs [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [23] ont étudié sur les meilleures façons de mesurer la présence. Ils ont tiré de leurs recherches des mesures fiables, valides, déterminantes et objectives. Ainsi, les réponses physiologiques intéressantes à mesurer sont : le rythme cardiaque, le rythme respiratoire, la conductance de la peau.

Pour que les mesures reflètent le niveau de présence d'un individu dans un environnement virtuel, il est nécessaire que ce dernier permette des réactions comportementales. C'est un des paramètres à prendre en compte lors du développement de l'application.

2.3. Le mal du simulateur

2.3.1. Définition

Le mal du simulateur ressemble au mal des transports. Ses symptômes physiologiques sont similaires. Ils peuvent varier en forme, intensité et durée selon les individus: nausées, sueurs froides, fatigue visuelle, vertiges, étourdissements yeux ouverts ou fermés, vomissements,

etc. De même, le mal du simulateur peut être ressenti pendant et parfois après l'exposition à l'environnement virtuel [33] [34] [35] [36].

Plusieurs théories expliquent les origines de ce malaise : la théorie du conflit sensoriel, la théorie écologique du contrôle postural et la théorie évolutionnaire du poison.

Reason et Brand [37] basent leur théorie du conflit sensoriel sur la divergence entre les stimulations sensorielles et les sensations attendues par l'utilisateur. Cette divergence peut être due à un manque d'informations sensorielles ou bien à une incohérence des retours sensoriels. Lorsque l'utilisateur immergé dans l'environnement virtuel se déplace, les éléments constituant l'environnement défilent devant ses yeux. L'utilisateur ressent alors un sentiment de vection lui donnant l'impression de se déplacer dans une direction. Toutefois, étant donné qu'il n'a pas réalisé le déplacement, le sens vestibulaire ne donne aucune sensation d'accélération ou de décélération. Dans des conditions réelles, les systèmes vestibulaire et visuel de l'utilisateur fournissent l'information sur le déplacement et, par conséquent, ceci est la perception attendue par l'utilisateur. Lorsqu'il ne reçoit pas la réponse attendue, un conflit se produit et le mal du simulateur peut en résulter.

La théorie écologique du contrôle postural, développée par Riccio et Stoffregen, est centrée sur l'idée que l'un des objectifs principaux du comportement chez l'être humain est de maintenir la stabilité posturale dans l'environnement. Dans ce cas, la stabilité posturale est définie comme l'état dans lequel les mouvements incontrôlés des systèmes de perception et d'action sont réduits au minimum. Cette stabilité posturale est limitée en fonction de la nature du milieu environnant. La théorie repose sur l'augmentation de l'instabilité posturale du corps et des segments corporels lorsqu'ils sont soumis à des ondes d'interférence dues à l'interaction des fréquences d'oscillations naturelles du corps et celles imposées. Cette théorie permet à Stoffregen et al. [38] [39] de prédire le mal du simulateur avant que ses symptômes apparaissent.

La théorie de poison [40] tente de fournir une explication d'un point de vue évolutif à pourquoi le mal du simulateur se produit. Cette théorie suggère que l'ingestion de poison provoque des effets physiologiques impliquant la coordination du visuel, vestibulaire et d'autres systèmes d'entrées sensorielles. Ces effets physiologiques agissent en tant que système d'alerte précoce qui améliore la survie en retirant le contenu de l'estomac. La stimulation indésirable trouvée dans certains environnements virtuels peut affecter le système visuel et vestibulaire de telle sorte que le corps estime qu'il a ingéré un certain type de substance toxique provoquant ainsi les symptômes qui conduisent à une réponse émétique. La théorie du poison fournit une hypothèse intéressante pour l'apparition du mal du simulateur. Cependant, cette théorie manque d'un pouvoir prédictif et n'explique pas pourquoi les

personnes qui tombent malades dans les environnements virtuels n'ont pas toujours une réponse émétique.

2.3.2. Paramètres mis en jeu

Il existe beaucoup de paramètres influant sur le mal du simulateur. Il est possible de les séparer en trois catégories [41] [35] [42]. La première regroupe les facteurs liés aux stimuli comme le type de mouvement, le délai ou bien la taille du champ de vision. Les caractéristiques des individus forment la seconde catégorie ; cela correspond à l'âge, le genre, l'expérience préalable, la prédisposition au mal du transport… Enfin, la dernière catégorie est constituée des paramètres liés à la tâche, comme la durée d'exposition, le niveau de contrôle des utilisateurs, … .

Toute expérience de réalité virtuelle reste aujourd'hui susceptible d'engendrer le mal du simulateur, et ce, malgré la connaissance des paramètres et processus qui influent sur elle. A l'heure actuelle, il n'existe pas de système immersif qui permette de s'affranchir de ce mal. D'après de nombreux auteurs, mis à part le fait de rendre malades les utilisateurs, le problème majeur du mal du simulateur est qu'il peut distraire l'utilisateur et lui faire adopter un comportement artificiel voir inadapté. Il provoque même l'abandon de l'utilisateur dans certains cas.

Nichols et al. [43] et Stanney et al. [44] mettent en évidence d'autres impacts négatifs du mal du simulateur sur le sentiment de présence ressenti par l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Le mal du simulateur permet donc de déterminer la validité psychologique d'une application de réalité virtuelle [45]. Il est par conséquent nécessaire de contrôler le mal du simulateur lors de l'utilisation d'une application de réalité virtuelle pour en déterminer sa qualité.

2.3.3. Mesures subjectives

Il existe différentes méthodes pour déterminer le mal du simulateur ressenti par un individu lors d'une immersion dans un environnement virtuel [46]. Cependant, la méthode la plus courante reste le Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) conçu il y a plus de 20 ans par Kennedy et al. [47]. Le SSQ est utilisé pour décrire et mesurer le mal du simulateur. Il est constitué de 16 questions auxquelles les sujets doivent répondre sur une échelle de 0 à 3 (RAS – Sévère). Ces questions peuvent être réparties sur trois catégories distinctes : Oculomoteur, Désorientation et Nausée. Ces trois catégories pondérées permettent d'établir un score représentant le mal du simulateur global [48] [49].

Le questionnaire se présente sous la forme suivante :

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

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

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

La répartition factorielle se fait de la manière suivante :

- Nausée = (1+6+7+8+9+15+16)*9.54 = N*9.54
- Oculomoteur = (1+2+3+4+5+9+11)*7.58 = O*7.58
- Désorientation = (5+8+10+11+12+13+14)*13.92 = D*13.92
- Total = (N+O+D)*3.74

Cela permet de qualifier le mal du simulateur comme suit :

Score	Analyse
0	Pas de symptômes
<5	Symptômes négligeables
5-10	Symptômes minimes
10-15	Symptômes significatifs

15-20	Symptômes préoccupants
>20	Problèmes sur le simulateur

En amont du SSQ, il faut prendre en compte la prédisposition des personnes aux malaises provoqués par des environnements mobiles variables à l'aide du Motion Sickness History Questionnaire (MSHQ) [50] [51]. Le MSHQ est constitué de 9 questions portant sur le passé du sujet. Ce questionnaire permet d'anticiper l'impact de la simulation sur les individus [52].

2.3.4. Mesures Objectives

Il a été déterminé par Casali et Frank [53] que le rythme cardiaque change en fonction de la simulation. Malheureusement, ces changements ne sont pas significatifs, fiables ou toujours dans le même sens. Ainsi il peut augmenter chez un sujet et diminuer chez un autre. En revanche, ils ont prouvé que le rythme respiratoire était significatif même si la variation n'est pas dans le même sens suivant les sujets. Ainsi, en mesurant la différence absolue entre le rythme avant la simulation et pendant la simulation, on peut obtenir une indication sur le mal du simulateur.

La sudation étant un des symptômes du mal du simulateur, la conductance de la peau est donc une valeur reflétant celui-ci. Si la conductance augmente, l'utilisateur est sujet au mal du simulateur.

La pâleur est aussi un paramètre mesurable reflétant le mal du simulateur.

Une autre mesure objective représentative du mal du simulateur est l'instabilité posturale [54] [55]. Il est même prouvé que cette instabilité précède le mal du simulateur. Cette instabilité se mesure à l'aide d'une balance permettant de tracer la trajectoire du centre de gravité sur une période de quelques secondes. Ainsi en mesurant la différence entre avant et après exposition on peut déterminer si le sujet est malade ou non. Pour cela, il faut calculer la surface parcourue par le centre de gravité et étudier ses fréquences d'oscillations.

2.4. La navigation

Le déplacement est l'élément moteur de la navigation. La navigation est la tâche qui correspond à l'exécution d'une action qui nous anime pour aller de notre emplacement actuel à un nouvel emplacement cible [56] [57]. Dans l'environnement réel, le déplacement est réalisé comme une évidence, il s'agit d'une action de cognition inconsciente. C'est pourquoi il est essentiel que le déplacement dans l'environnement virtuel soit proche du déplacement dans le monde réel. L'utilisateur peut être amené à se déplacer dans l'environnement virtuel pour de nombreuses raisons. La compréhension des différents types de tâches de déplacement est importante, car la facilité d'utilisation d'une technique particulière dépend

souvent de la tâche pour laquelle elle est utilisée. La navigation est une tâche commune à toutes les applications de réalité virtuelle même si l'objectif principal de l'application n'est pas de se déplacer.

2.4.1. Way finding et déplacement

La navigation regroupe les tâches de « way finding » et de déplacement. Le « way finding » est l'élément cognitif de la navigation. Il n'implique aucun mouvement mais seulement la tactique et la stratégie permettant de guider le mouvement vers l'emplacement voulu [58]. Le comportement de navigation des utilisateurs a largement été étudié [59] [60] [61]. Pour naviguer, les utilisateurs prévoient leur déplacement à l'aide d'une carte mentale de l'environnement basée sur la connaissance spatiale acquise lors de l'immersion. Cependant, l'acquisition de ces données est plus ou moins longue et de ce fait, les utilisateurs ne sont pas toujours prêts à passer ce temps sur cette acquisition. C'est pourquoi les interfaces de réalité virtuelle donnent des indications pour aider l'utilisateur à s'orienter. Sans ces indications, l'utilisateur est désorienté.

Il est très important de savoir comment nous pouvons atteindre l'emplacement cible. Certains paramètres tels que la vitesse et l'accélération ont un effet sur l'utilisateur. Par exemple, une vitesse de déplacement trop élevée ou des variations subites de celle-ci peuvent engendrer le mal du simulateur.

Comme la cible et les paramètres de déplacement, le périphérique d'interaction est aussi important pour une interaction appropriée.

2.4.2. Interaction pour la navigation

Beaucoup d'interfaces permettant de se déplacer dans l'environnement virtuel existent. Elles utilisent des métaphores plus ou moins poussées allant de l'appui d'une touche de clavier à la marche redirigée.

Les interfaces les plus connues sont le clavier/souris et le gamepad. Mais il est aussi possible d'utiliser la reconnaissance vocale ou la marche sur place à l'aide d'un Kinect par exemple. Chacune des interfaces a ses avantages et inconvénients. Terziman et al. montrent [62] que l'utilisation d'un joystick permet de mieux contrôler sa direction, tandis que la méthode de Walk-in-place permet de mieux gérer sa vitesse. Pour comparer ces deux méthodes, des trajectoires de slalom réalisées avec les deux méthodes ont été comparées en termes de temps de parcours et de surface d'écart avec la trajectoire optimale.

Les chercheurs développent toujours de nouvelles métaphores, comme cette nouvelle métaphore développée par Terziman et al. [63] où les mouvement de la tête permettent de

se déplacer. Pour se déplacer, il suffit de déplacer sa tête de gauche à droite en amplifiant le mouvement naturel de la marche. Ce système permet de gérer facilement sa vitesse et de choisir différentes positions (debout, à genoux).

2.5. Vibration

Maintenant que nous avons défini les enjeux de la présence et du mal du simulateur ainsi que les principes de la navigation, il est nécessaire de donner une définition de ce que sont les vibrations et comment celles-ci peuvent être utilisées pour l'aide à la navigation dans un environnement virtuel.

Une vibration est un phénomène mécanique. Un système vibre s'il est animé de petits mouvements au voisinage d'une position d'équilibre. Un signal vibratoire peut être décomposé à l'aide de la transformée de Fourier. On peut alors déterminer la fréquence fondamentale et les harmoniques composant la vibration. [64].

Il est possible alors de modéliser le signal vibratoire de la façon suivante :

$$S_{mécanique} = A_{fond}\sin(2 * \pi * f_{fond} * t + \varphi_0) + A_{Harm1}\sin(2 * \pi * f_{Harm1} * t + \varphi_1) + A_{Harm2}\sin(2 * \pi * f_{Harm2} * t + \varphi_2) \ldots$$

Avec $|A_{fond}| > |A_{Harm1}| > |A_{Harm2}| > \ldots$ et $f_{fond} < f_{Harm1} < f_{Harm2} < \ldots$

Cette définition permet de comprendre à quoi correspondent les vibrations. Nous allons donc voir comment elles sont utilisées pour l'aide à la navigation.

2.6. La proprioception

La proprioception permet de savoir où se situent en chaque moment les différentes parties de notre corps. Ce sont les viscères, la peau, l'oreille interne, les positions des différentes articulations et les niveaux de contraction des muscles qui permettent de savoir leur position sans utiliser la vue.

Les muscles possèdent des fuseaux neuromusculaires qui se situent en majeure partie à la jonction entre le tendon et la fibre musculaire. Lors de l'élongation du muscle, les fuseaux neuromusculaires envoient un signal entre 70 et 90 Hz au cerveau. Ce signal permet de connaître la position du muscle et donc des parties du corps associées. Il est possible de simuler ces impulsions à l'aide de vibreurs. Ainsi, en faisant vibrer ces fuseaux neuromusculaires et en induisant un mouvement à l'individu, il est possible de simuler ce mouvement. L'individu pense alors réaliser le mouvement alors qu'il ne bouge pas.

On peut déduire de ce constat qu'il est possible de simuler la réalisation d'un mouvement de l'utilisateur immergé.

De même ce constat a été prouvé par Roll et al. [65] [66] [67] lorsqu'il est arrivé à faire ressentir des mouvements à des sujets à l'aide de vibrations uniquement (Figure 9). Ainsi il est possible de réaliser virtuellement des mouvements.

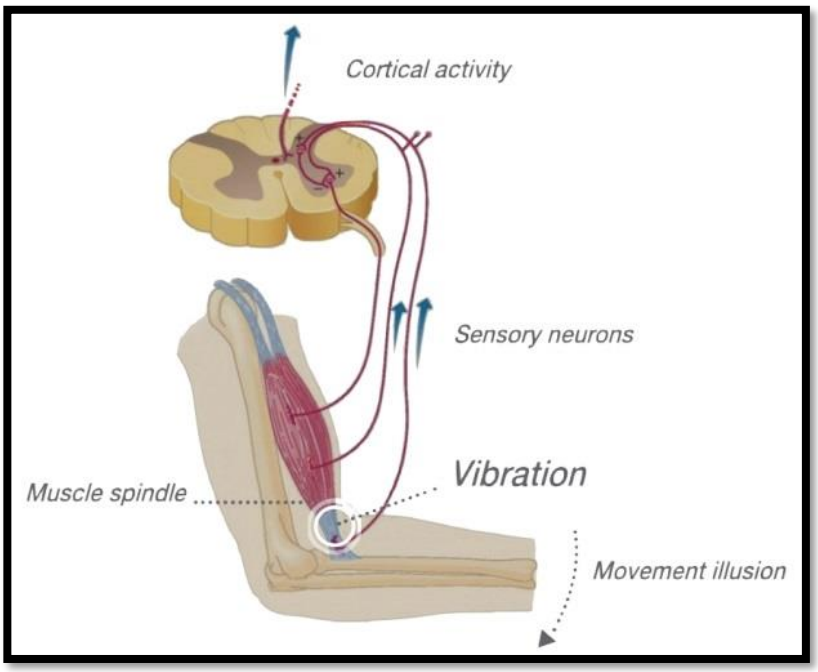


Figure 9: Fibres neuromusculaires (http://www.bioposturalsystem.it)

2.6.1. La marche et l'illusion proprioceptive

> *Proprioceptif : Qui se rapporte à la sensibilité du système nerveux aux informations provenant des muscles, des articulations et des os.*
>
> *La sensibilité proprioceptive complète les sensibilités intéroceptive (qui concerne les viscères), extéroceptive (qui concerne la peau) et celle des organes des sens. Elle permet d'avoir conscience de la position et des mouvements de chaque segment du corps (position d'un doigt par rapport aux autres, par exemple) et donne au système nerveux, de façon inconsciente, les informations nécessaires à l'ajustement des contractions musculaires pour les mouvements et le maintien des postures et de l'équilibre.*
>
> *Extrait du Larousse*

Comme l'indique l'extrait du Larousse Médical, la proprioception permet à l'Homme de connaître la position de son corps ainsi que les mouvements qu'il réalise. Elle met en jeu les organes proprioceptifs, composés des viscères, de la peau, des organes des sens et des muscles. En effet, la proprioception est possible grâce aux récepteurs microscopiques, propriocepteurs. Ils sont situés dans les muscles, plus particulièrement dans les fibres neuromusculaires. Ces récepteurs envoient l'information d'extension des muscles au cerveau. Le cerveau par la suite analyse ces informations et les applique à sa visualisation du corps. Ce modèle interne du corps est influencé par l'environnement et les prévisions de mouvement de l'individu. Ainsi, par anticipation, le cerveau attend certains retours proprioceptifs lorsqu'un mouvement est réalisé.

Les vibrations proprioceptives mises en place reposent sur deux principes. Le premier est le principe d'illusion proprioceptive [68] : en appliquant une vibration possédant une certaine fréquence à un muscle, il est possible de simuler une posture de ce muscle. Le deuxième principe est celui de mimétisme de l'Homme. Depuis l'enfance, l'Homme apprend par mimétisme, il reproduit les actions réalisées devant lui. Ce mécanisme est toujours actif ; ainsi de façon inconsciente, le cerveau reproduit toutes les actions qu'il voit se réaliser et les applique à son modèle de corps interne. Par conséquent, il anticipe aussi les retours sensoriels que devraient engendrer ces actions. On s'intéresse donc maintenant au mécanisme de la marche humaine.

Dans son travail de thèse, Chris Hayot [69] présente une modélisation du mécanisme de la marche. Pour commencer, il faut définir les plans de référence ainsi que les directions fondamentales du corps humain. La position de référence du corps humain est la position anatomique, l'individu est debout, droit, les pieds parallèles, les bras de chaque côté du corps, les paumes dirigées vers l'avant. Le plan sagittal coupe le corps en deux parties : droite et gauche. Le plan frontal le divise en deux parties : antérieure et postérieure, et enfin le plan transverse coupe le corps en deux parties : supérieure et inférieure (Figure 10).

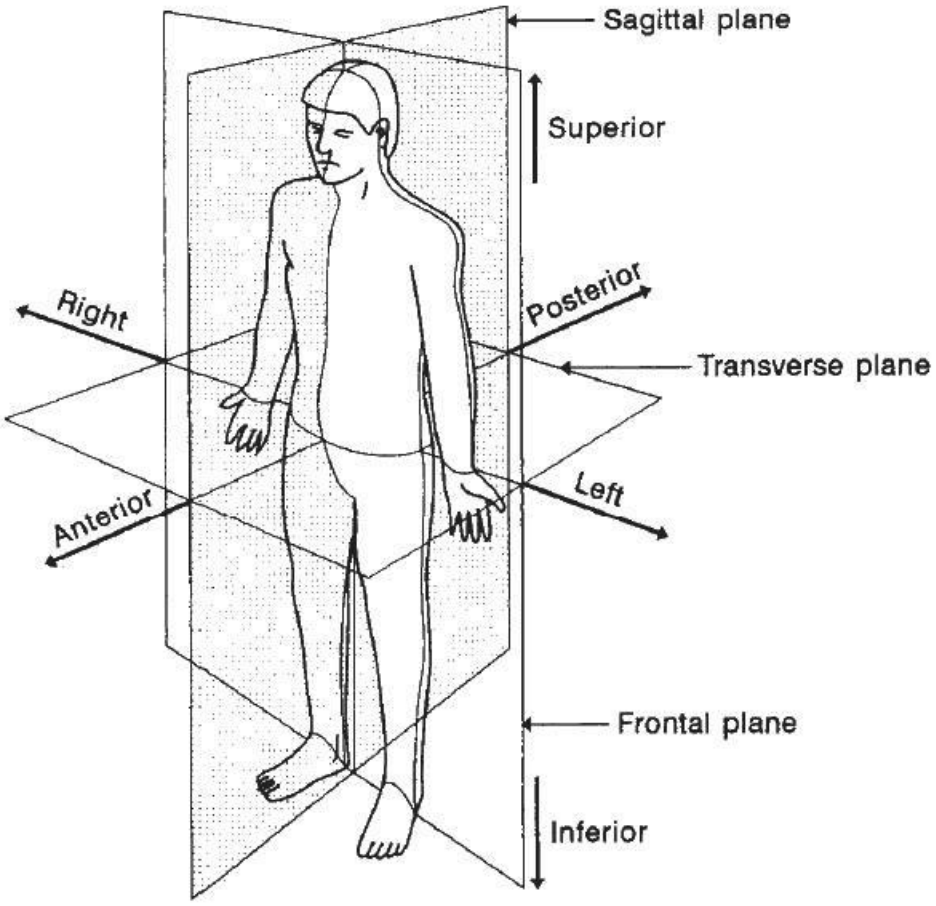


Figure 10 : Les trois plans de référence et six directions fondamentales du corps humain par rapport à la position anatomique [70].

L'objectif de la marche est de déplacer le centre de masse dans la direction de déplacement ; cette direction est parallèle au plan sagittal. La marche est constituée d'un schéma de mouvements cycliques correspondant aux pas. Les différentes phases du cycle sont exprimées en pourcentage par rapport au cycle complet. Ce cycle est composé de deux phases : la phase d'appui (60% du cycle) et la phase d'oscillation (40%) des membres inférieurs droit et gauche. Un autre découpage montre le cycle de marche comme un enchaînement de simple et double appuis. La phase de simple appui correspond au moment où un pied est en contact avec le sol pendant que l'autre jambe oscille. La phase de double appui correspond au moment où les deux pieds touchent le sol. Pendant la phase de double appui, l'ensemble du corps se déplace vers l'avant et le poids est transféré sur la jambe avant. Le cycle de marche peut être découpé plus finement (Figure 11 et Figure 12) :

- La phase de freinage (0 à 10% du cycle de marche)

Pendant la phase de freinage, le centre de masse est transféré vers la jambe avant en appui.

- La phase de début d'appui (10 à 30% du cycle de marche)

C'est la première moitié de la phase de simple appui. Elle amène le corps vers l'avant au-dessus du membre inférieur en appui. Elle prend fin quand le centre de masse est à sa hauteur maximale.

- La phase de fin d'appui (30 à 50% du cycle de marche)

C'est la fin de la phase de simple appui. Elle correspond au déplacement du corps jusqu'au début du contact du pied, opposé au pied d'appui, avec sol.

- La phase de propulsion (50 à 60% du cycle de marche).

Le centre de masse est transféré vers l'avant du corps sur la jambe en appui.

- La phase de début d'oscillation (60 à 73% du cycle de marche).

C'est le premier tiers de la phase oscillante. Elle s'arrête au moment où le pied oscillant se trouve au même niveau que le pied d'appui.

- La phase de milieu d'oscillation (73 à 86% du cycle de marche).

Deuxième tiers de la phase oscillante, elle se termine lorsque le tibia est en position verticale.

- La phase de fin d'oscillation (86 à 100% du cycle de marche).

Cette phase se termine lorsque le pied entre en contact avec le sol.

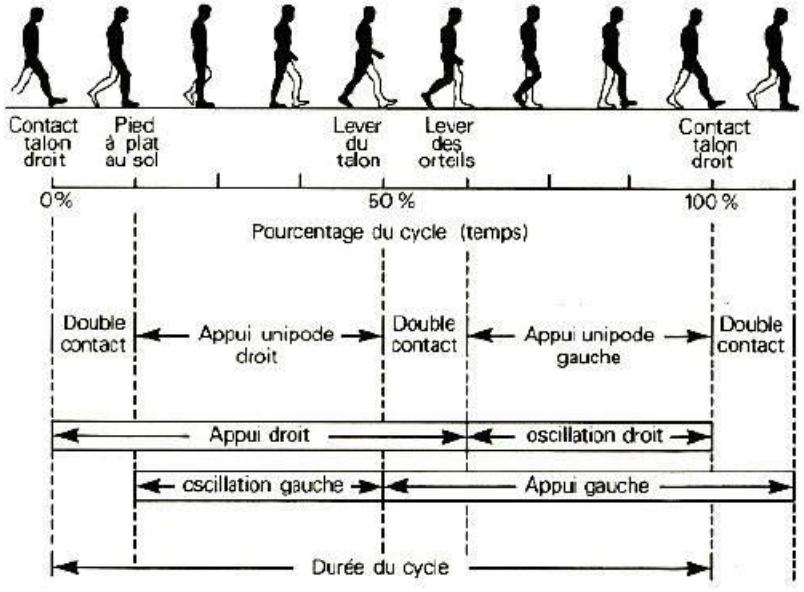


Figure 11: Représentation du cycle de marche d'après Viel [71]

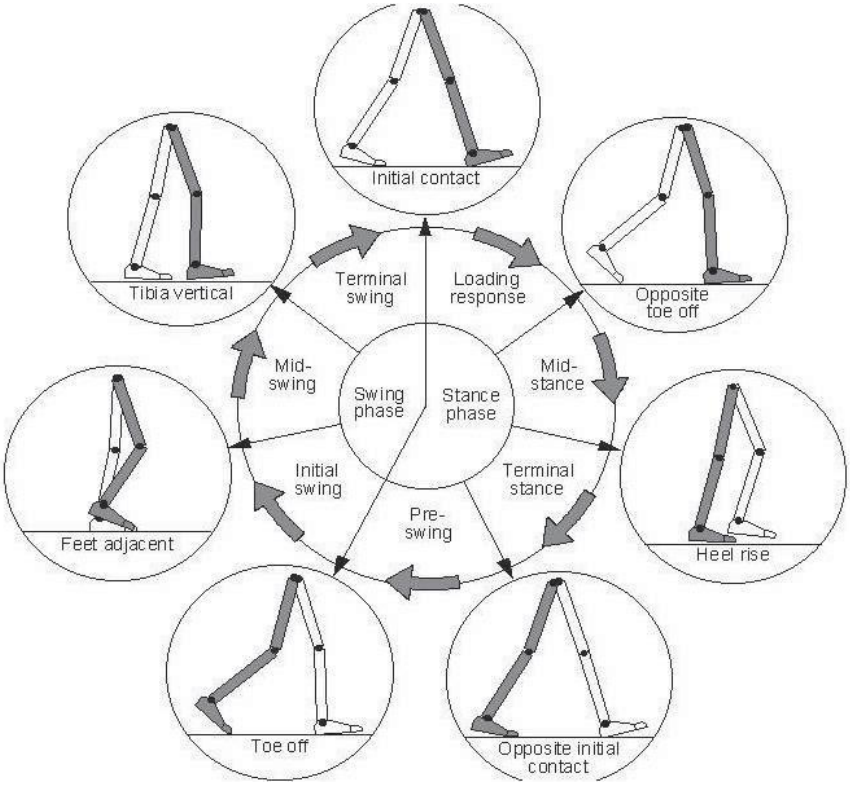


Figure 12 : Représentation du cycle de marche d'après Whittle [70]

Pendant la marche, le centre de masse se déplace donc en permanence vers l'avant.

2.7. Vibrations pour l'aide à la navigation

Dans un premier temps nous allons voir que les vibrations permettent d'aider à la navigation dans les simulateurs de conduite.

2.7.1. Simulateur de conduite

De plus en plus, les simulateurs de conduite sont munis de systèmes vibratoires permettant de produire des vibrations lors des simulations. Ces vibrations ont pour but de simuler les vibrations du moteur ou les vibrations dues au contact des roues avec le sol. Ces vibrations nous intéressent car elles permettent à l'utilisateur d'avoir une information sur son déplacement et aident donc à sa navigation.

Van Erp et van Veen [72] montrent même qu'il est possible d'utiliser les vibrations sur un siège de voiture pour permettre de diminuer la charge cognitive du conducteur. En effet, on peut communiquer des écarts de direction, la direction à prendre ou la présence d'obstacles grâce à des vibrations intégrées dans le siège.

L'apport de modalité vibratoire permet d'aider à la navigation aussi bien dans le monde réel que dans celui de la réalité virtuelle.

Les vibrations ne sont pas seulement utilisées dans ce cas-là. Elles permettent aussi d'ajouter une dimension aux environnements virtuels dans le cas de la marche humaine.

2.7.2. Simulation de la texture du sol

Les vibrations permettent de simuler la structure d'un sol virtuel. Papetti et al. [73] ou encore Turchet et al. [74] développent un système audio-tactile qui permet de simuler la structure du sol. Ce système est une chaussure équipée de vibreurs et d'un haut-parleur. Elle permet ainsi de reproduire les gammes spectrales des vibrations audibles et non audibles des impacts des pieds sur différents types de sol, tels que de la neige, du parquet,… . Visell et al. [75] montrent l'intérêt de ces vibrations en utilisant l'aspect sémantique de celles-ci. En effet, les vibrations permettent ainsi de transmettre des données supplémentaires, comme la qualité d'adhérence du sol sur lequel l'utilisateur est en train de marcher, par exemple.

2.7.3. Vibrations relatives au déplacement

Les vibrations peuvent aussi être utilisées pour donner des informations sur le déplacement dans l'environnement virtuel.

Ainsi, Terziman et al. [76] démontrent que l'utilisation de vibrations appliquées sur les pieds et sur l'affichage à chaque pas de l'avatar permet d'améliorer la sensation de marcher lors de simulations sur ordinateur.

Les vibrations sur les pieds reproduisent la vibration créée lorsqu'on pose le pied par terre. Elles font donc transparaître le contact avec le sol. Dans une autre expérience [77], ils déterminent que l'ajout de vibrations visuelles de la caméra reproduisant les vibrations que l'on ressent visuellement lorsqu'on se déplace permet une amélioration de la présence. En effet, avec le « Camera Motions » développé dans cette étude, les sujets pouvaient déterminer les caractéristiques physiques de l'avatar sans le voir et déterminer aussi le mode de déplacement avec les informations visuelles uniquement. Le « Camera Motions » est multi-état et personnifiable.

Les vibrations créées par Terziman et al. cherchent à reproduire la réalité. Mais il est aussi possible d'utiliser des métaphores, comme l'indique Farkhatdinov et al. [78] ; on peut améliorer le ressenti de mouvement grâce à des vibrations continues. Ces vibrations sont transmises au niveau des pieds et reproduisent un mouvement de glissement par rapport au sol. De même, Lind et al. [79] montrent que l'ajout de vibrations continues lors de la simulation permet un retour supplémentaire sur l'effet de vection ressenti lors d'un déplacement virtuel.

Les vibrations peuvent donc être utilisées pour donner des informations sur le déplacement. Cependant elles sont le plus souvent utilisées pour aider à s'orienter dans le monde virtuel mais aussi réel.

2.7.4. Orientation

i. Réelle

Les domaines d'application des vibrations pour l'aide à l'orientation sont l'armée et le monde médical.

McGrath [80] explique que les vibrations appliquées sur le corps des pilotes d'avions de chasse permettent de diminuer leur charge cognitive. En effet, les vibrations leur permettent de savoir s'il y a un danger autour et dans quelle direction il se trouve. De même, elles permettent de connaître l'orientation de l'avion en permanence, en indiquant l'axe horizontal.

Pour le médical, Uchiyama et al. [81] montrent un exemple avec l'implémentation de vibreurs sur des gants pour utiliser un fauteuil roulant permettant d'aider les malvoyants à s'orienter et les prévenir d'un danger. Ce système leur permet de voir le monde qui les entoure à l'aide de schémas de vibrations.

ii. Virtuelle

Pour l'orientation dans le monde virtuel, Burigat et Chittaro [82] utilisent des vibrations transmises aux mains par l'intermédiaire d'un gamepad. Celui-ci vibre lorsque l'utilisateur se dirige vers le point de passage permettant d'atteindre la destination. Il montre aussi que la capacité à s'orienter dans un environnement virtuel dépend des systèmes d'aide mis en place ainsi que de l'expérience d'immersion en réalité virtuelle de l'utilisateur. Lorsque l'utilisateur est expérimenté, les aides mises en place ont toutes le même impact, tandis que pour des néophytes, l'utilisation d'une flèche 3d orientée vers l'objectif est plus performante.

Chapitre 2 - Méthodologie

1. Axe de recherche

Cet état de l'art met en place le contexte dans lequel se trouve actuellement la réalité virtuelle, un domaine à la pointe de la technologie. Malgré les avancées technologiques et techniques, le mal du simulateur engendré par les simulations de réalité virtuelle reste un facteur important qui dégrade l'expérience de l'utilisateur. Beaucoup de travaux sont réalisés dans l'objectif de diminuer, voire de faire disparaître, le mal du simulateur. De même, parallèlement au mal du simulateur, d'autres recherches portent sur le principe de présence. Leur objectif est de déterminer un moyen, quel qu'il soit, permettant à l'utilisateur en immersion dans un environnement virtuel une expérience complète dans laquelle il sera plongé et sera à la limite de ne plus pouvoir discerner la frontière entre le monde virtuel et le monde réel. Ses actions dans l'environnement virtuel lui paraîtront naturelles. L'interface homme-machine sera alors invisible pour lui.

Ce travail de recherche s'inscrit au croisement de ces deux sujets en abordant les différents aspects vibratoires qu'il est possible d'ajouter à une simulation de réalité virtuelle.

- Quelles sortes de vibrations peuvent influer sur la simulation ?
- Sur quelle partie de la simulation les vibrations peuvent-elles être implémentées pour permettre un impact efficace ?
- Quel peut être cet impact ?
- Les vibrations peuvent-elles augmenter les performances de l'utilisateur dans la simulation ? Sur quelle tâche ?
- Peuvent-elles diminuer l'impact du mal du simulateur ? Dans quelles conditions ?
- Les vibrations sont-elles un moyen d'augmenter le sentiment de présence de l'utilisateur lors de l'immersion en environnement virtuel ?

Ces questions peuvent être résumées comme suit :

Quels sont les impacts de l'utilisation de vibrations implémentées pour l'aide à la navigation en environnement virtuel pour ce qui est du mal du simulateur, de la présence et des performances ?

L'orientation de ce projet se porte particulièrement sur la navigation en environnement virtuel. L'objectif de ce travail sera donc de répondre à ces questions dans le cadre d'utilisation de vibrations pour l'aide à la navigation en environnement virtuel. Les vibrations seront donc utilisées sur différents aspects de la navigation. En effet, comme vu précédemment, la

navigation en environnement virtuel comporte deux axes, l'aspect cognitif de la navigation ; la détermination du trajet à emprunter pour se rendre à l'endroit désiré ; et l'aspect actif de la navigation qui, lui, est porté sur le moyen de se déplacer depuis un point de départ jusqu'au point d'arrivée. Nous nous pencherons donc dans un premier temps sur la partie d'action de la navigation pour déterminer quels sont les impacts de l'ajout de différentes vibrations pour ce qui est du mal de simulateur, présence et performance. Ensuite, nous déterminerons ce que peuvent apporter les vibrations pour ce qui est des performances lorsqu'elles sont implémentées pour améliorer la partie cognitive de la navigation.

Dans une première partie, nous déterminerons les différentes familles d'interactions de navigation existant en réalité virtuelle, pour mettre en avant celles utilisées dans ce projet de recherche. Ensuite, nous traiterons l'aspect actif de la navigation en déterminant dans un premier temps les vibrations utilisables lors d'une simulation de conduite, et par la suite celles utilisables lors d'une simulation où l'immersion permet une navigation liée à la marche. Enfin, nous déterminerons les différents impacts des diverses modalités vibratoires sur le mal du simulateur, la présence et la performance en fonction des méthodes de navigation.

Dans une autre partie, nous traiterons la partie cognitive de la navigation et déterminerons deux différents schémas de vibration permettant d'aider l'utilisateur à s'orienter et trouver son chemin dans l'environnement virtuel. Nous pourrons alors ensuite comparer ces deux schémas pour déterminer leur capacité d'amélioration de l'expérience de réalité virtuelle pour ce qui est des performances principalement.

Enfin, nous pourrons conclure sur les différents aspects abordés dans ce sujet et en voir les perspectives possibles.

2. Navigation

La navigation est l'une des composantes essentielles de la réalité virtuelle : pour naviguer avec succès, les utilisateurs doivent planifier leurs déplacements en utilisant les connaissances spatiales acquises sur l'environnement et stockées sous forme de carte mentale. Cependant, 20% à 30% des utilisateurs ont souvent des difficultés à naviguer dans les environnements virtuels [83]. La navigation dans les environnements virtuels se caractérise par une acquisition plus lente des connaissances spatiales que dans le monde réel et, parfois, par l'extrême difficulté à trouver des endroits au cours de l'exploration. Cela représente des défis tels que le maintien de la conscience spatiale, assurant un mouvement efficace et confortable entre les différents endroits, et rendant la navigation fluide afin que les utilisateurs puissent se concentrer sur des tâches plus importantes.

Bowman et al. [84] séparent la navigation en deux tâches distinctes comme dit précédemment, la composante active de la navigation - le trajet - et la composante cognitive - la planification d'itinéraire ou « wayfinding ».

2.1. Cognition de la navigation

Le wayfinding est le processus cognitif de la navigation, c'est le fait de définir son chemin au travers de l'environnement virtuel en utilisant la connaissance spatiale acquise avec l'exploration visuelle et physique de celui-ci. Cela permet la construction d'une carte cognitive de l'environnement. L'absence éventuelle de signaux présents dans le monde réel, comme par exemple l'estimation de distance et de vitesse, ainsi que les limitations, comme le champ de vision étroit, rendent plus difficile pour les utilisateurs de développer une compréhension spatiale de l'environnement virtuel [85]. De ce fait, il est facile d'être désorienté dans un environnement virtuel offrant un grand sentiment de liberté. C'est pour cette raison que l'utilisateur doit recevoir des aides pour le wayfinding [84] [86].

Lorsque nous nous déplaçons dans le monde réel, la plupart d'entre nous a tendance à accorder peu d'attention particulière aux processus mentaux qui permettent notre navigation. Pendant des décennies, les psychologues ont étudié le traitement cognitif nécessaire pour comprendre cette compétence développée. En règle générale, le développement des compétences spatiales est décrit comme une progression de structures déclaratives initiales du savoir, à travers la formation de structures procéduralisées, jusqu'à des représentations plus configurationnelles [87] [88]. Ces représentations sont les points de repère, la carte mentale et l'amélioration continue.

2.1.1. Les points de repères

Au cours de notre première exposition à un nouvel espace, nous apprenons à reconnaître les repères ou les principales caractéristiques de l'environnement [87]. Les propriétés telles que la texture, la forme et l'orientation de certains objets sont stockées dans des structures de connaissances déclaratives, ce qui nous permet d'accéder à cette connaissance [89] [90]. Par exemple, en arrivant sur un nouveau campus universitaire, les étudiants peuvent apprendre à identifier la bibliothèque, les bâtiments administratifs et les principales salles de cours.

2.1.2. La carte mentale

La connaissance historique déclarative devient de plus en plus précieuse au fur et à mesure que nous apprenons à relier les repères spatialement individuels à d'autres dans l'environnement. Cela permet la création d'une représentation mentale de l'environnement

dans laquelle on estime les distances, orientations relatives et routes reliant les différents centres d'intérêt. En substance, nous procéduralisons et construisons sur la connaissance déclarative que nous apprenons.

Les principales caractéristiques de la représentation mentale de l'environnement sont : 1) elle est apprise dans le cadre de l'accomplissement de tâches spécifiques ; 2) elle est représentée de façon égocentrique (les virages à droite et à gauche sont appris par rapport à l'orientation et la direction du trajet) ; et 3) elle dépend de la perspective, ce qui signifie qu'elle est plus précise lorsqu'elle est employée dans la même condition de visualisation que lors de l'apprentissage.

Enfin, lorsque nous sommes confrontés à la tâche de trouver des voies alternatives pour des destinations, nous nous appuyons sur des calculs algébriques et géométriques informels, sur la base des changements de direction et les distances qui décrivent les routes connues.

2.1.3. Amélioration continue

Au fur et à mesure que nous évoluons dans un environnement, nous nous familiarisons de plus en plus avec celui-ci. La nouvelle représentation plus souple permet de mettre en place les points de repère de façon indépendante du trajet, de définir de façon globale les relations entre les chemins. Le repère egocentrique devient un repère global offrant la possibilité de voir le monde comme sur une carte en papier [87]. Ce processus peut être assimilé au sens de l'orientation.

2.2. Action de navigation

Conjointement à la détermination du trajet qu'il faut emprunter pour se rendre à l'endroit voulu, on agit pour se déplacer. Dans le monde réel, cette action peut se réaliser avec différentes méthodes. Ce sont les moyens de locomotion. Nous pouvons nous déplacer en marchant, courant, à vélo, en overboard, en voiture, en bateau, en avion ou bien avec tout autre moyen de déplacement adapté à l'être humain.

En revanche pour se déplacer dans l'environnement virtuel, il est nécessaire d'utiliser des métaphores car l'espace de déplacement physique disponible est restreint par rapport aux possibilités de déplacement que peut offrir un environnement virtuel.

2.2.1. Classifications

Bowman propose une classification des méthodes d'interaction pour la navigation en environnement virtuel [84]. Cette classification possède cinq catégories. Le mouvement physique, la manipulation manuelle du point de vue, le volant/joystick, le trajet orienté sur la

position cible ou « Target-based travel » et le tracé de la trajectoire à suivre ou « Route planning » (Figure 13).

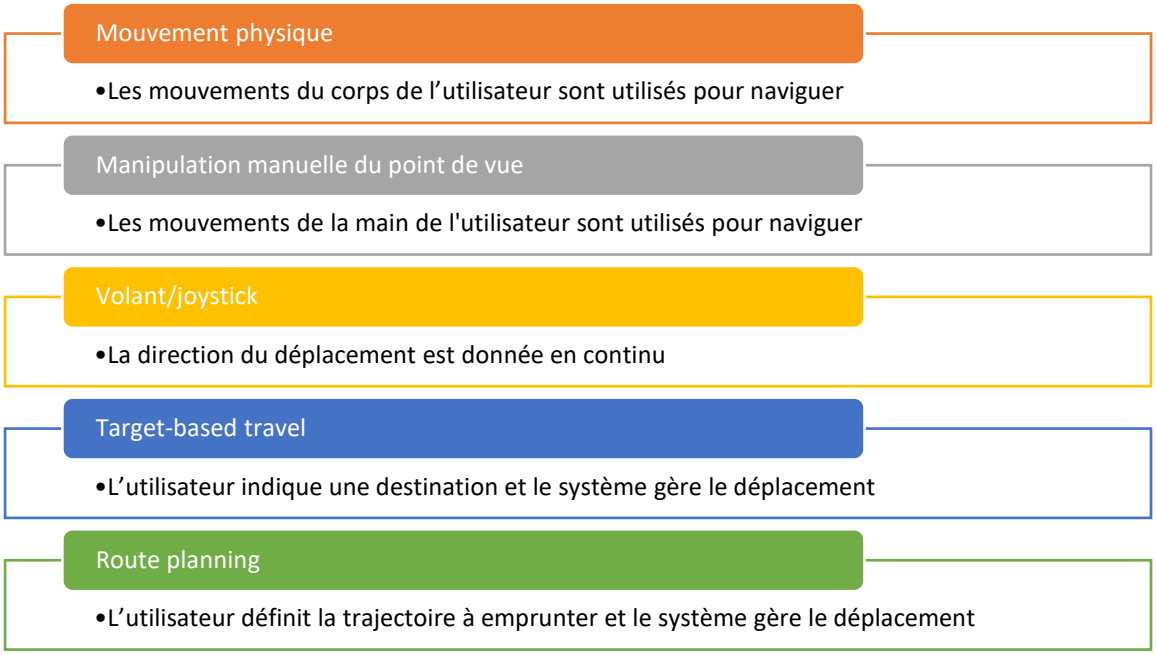


Figure 13 : Catégories d'interactions pour la navigation

Cette classification permet de catégoriser des interactions de natures différentes. En parallèle de cette classification, il faut définir les méthodes d'interaction avec l'ordinateur. Pour chaque classe, nous pouvons utiliser différents périphériques et donc métaphores d'interactions. De mêmes périphériques peuvent être utilisés dans différentes classes de navigation.

En observant les périphériques existants et les métaphores usuelles, il est possible de définir deux catégories d'interactions, les interactions concrètes et les interactions abstraites. Les interactions concrètes sont basées sur des interactions directes avec l'environnement virtuel, un mouvement de l'utilisateur agit directement sur son déplacement et les interactions sont plus ou moins naturelles avec une métaphore très peu poussée. Les interactions abstraites sont définies par des métaphores poussées.

Il est aussi possible de déterminer deux référentiels d'interactions distincts, le référentiel Egocentré [91], quand les actions réalisées pour effectuer un déplacement agissent directement sur l'avatar de l'utilisateur, et le référentiel Exo-centré [91], quand les actions agissent sur autre chose que l'avatar mais permettent tout de même le déplacement de celui-ci.

La Figure 14 ci-après propose des exemples de métaphores ou périphériques utilisables suivant les catégories définies précédemment.

Référentiel \ Interaction	Concrète	Abstraite
Égo-centré	- Marche sur place - Tapis roulant	- FPS - Voiture virtuelle
Exo-centré	- « GoGo Navigation » - « Atlas Control »	- Compagnon virtuel - « Target navigation »

Figure 14 : Différentes méthodes de navigation réparties suivant notre classification

2.2.2. Exemples d'interactions et métaphores

i. La marche, la marche redirigée, la marche sur place, Joyman

La marche est la méthode de navigation la plus naturelle. Elle permet de se déplacer dans l'environnement virtuel comme dans le monde réel, elle n'engendre donc pas ou peu de problèmes par rapport au sentiment de présence ou mal du simulateur. Les limites de la marche naturelle correspondent aux limites physiques du système immersif. L'environnement virtuel est souvent plus grand que l'espace physique offert par le simulateur. Il est donc impossible d'utiliser uniquement cette méthode de navigation dès lors que les environnements virtuels deviennent grands.

La marche redirigée [92] [93] est une solution pour annuler cette limite dans une certaine mesure. La marche redirigée consiste à faire marcher l'utilisateur en redirigeant son point de vue en permanence pour qu'il reste dans les limites physiques du simulateur sans se rendre compte des changements de direction. Ainsi, lorsque l'utilisateur avance en ligne droite dans l'environnement virtuel, il réalise une courbe dans le monde réel. Pour duper l'utilisateur, il est possible d'agir sur différents paramètres de navigation comme le gain en translation, le gain en rotation et le gain en courbure. L'idée est de modifier ces paramètres dynamiquement en fonction de la position de l'utilisateur dans le système immersif. Il faut cependant garder en tête qu'il existe des limitations : à partir d'un certain seuil de différence entre le mouvement réel et le mouvement virtuel, l'utilisateur s'en rend compte, ce qui le sort de l'immersion. Cette technique est donc pratique car elle garde l'aspect de marche naturelle et permet de naviguer dans de grands espaces virtuels tout en étant dans un environnement réel restreint. Il faut cependant un espace accessible réel assez étendu, ce qui restreint les types de systèmes immersifs utilisables (Figure 15).

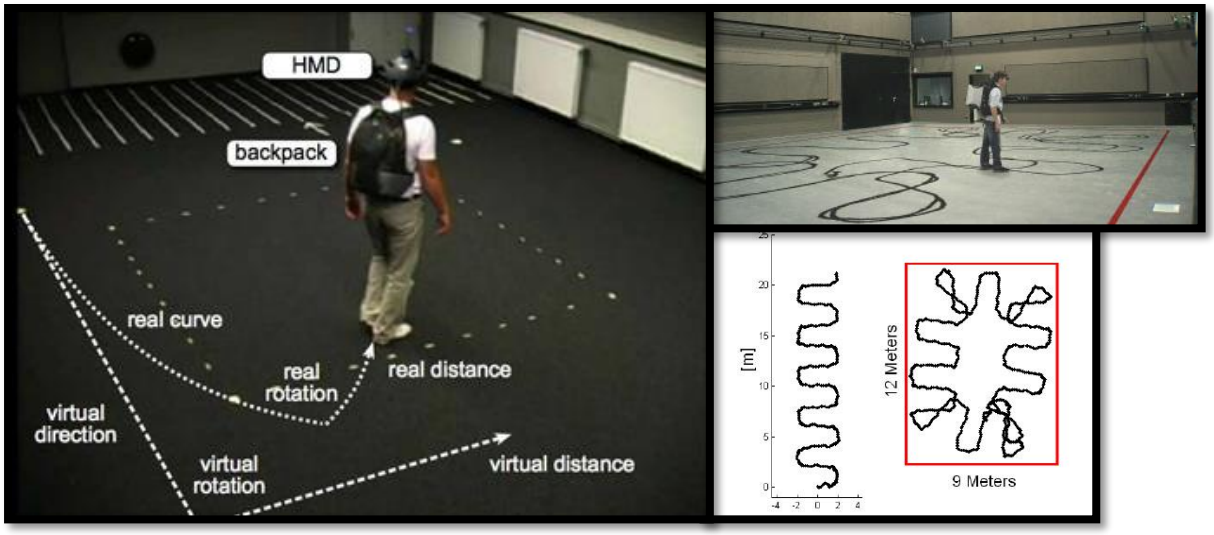


Figure 15 : Différentes techniques de marche redirigée [86]

La marche sur place [94] consiste à augmenter la métaphore pour réduire l'espace réel nécessaire. Ici l'utilisateur réalise des pas sur place pour avancer dans l'environnement virtuel (Figure 16). Le fait de mimer la marche permet de garder un degré de présence et de sentiment d'action car cela permet un retour kinesthésique. En revanche, la marche sur place perd en précision par rapport à la marche naturelle ou redirigée et est à déconseiller pour les applications impliquant beaucoup de navigation. Elle nécessite aussi l'utilisation d'un système immersif permettant une visualisation et interaction à 360°.



Figure 16 : Marche sur place avec WizDish ROVR VR locomotion platform

Enfin, il est possible de rediriger la marche sur place, ce qui permet l'utilisation d'un système immersif moins complet tel qu'un CAVE. L'utilisateur est alors en permanence redirigé de façon imperceptible en direction de la face principale ou de l'axe principal du système d'immersion.

Ces types d'interactions sont dans la catégorie Égo-centrée concrète car les actions sont tournées sur l'utilisateur ; lorsqu'il agit, il agit directement sur son avatar et ses actions sont

concrètes, l'utilisateur réalise une action dans le monde réel qui est similaire à celle effectuée dans l'environnement virtuel.

Dans cette catégorie on peut citer aussi la méthode de navigation appelée « JoyMan » [95] : ici, la posture de l'utilisateur est apparentée à un joystick et lui permet de se déplacer comme il le ferait avec un overboard. Il lui suffit alors de se pencher dans la direction dans laquelle il souhaite se déplacer. Plusieurs méthodes d'acquisition sont possibles, de la simple Kinect à une plateforme comme la Wii balance Board en passant par le dispositif « JoyMan » développé par Marchal et al.

ii. Déplacement sur carte 2D/3D, GoGo Navigation.

Pour se déplacer dans le monde réel, nous utilisons des cartes pour nous repérer. Cet outil est donc instinctif à utiliser en environnement virtuel. Ici, on propose d'utiliser la carte comme un outil pour déplacer notre avatar dans l'environnement virtuel. Ainsi, pour déplacer l'avatar il est possible simplement de désigner l'emplacement où l'utilisateur souhaite se rendre. De même, il est aussi possible de déplacer la carte par rapport à l'avatar. Les déplacements sont cependant assez brusques du fait de tenir une carte qui est à échelle réduite. Ce mode de déplacement est en revanche très bien adapté pour de grands déplacements.

La « GoGo navigation » reprend le principe de manipulation de la carte et celui de « Grabbing the air » de Mapes et Moshell [96] mais ici, l'utilisateur attrape l'environnement virtuel autour de lui pour le déplacer. Il est alors possible de combiner cela avec la technique GoGo, de sorte que, plus les mouvements sont grands, plus le déplacement est grand (Figure 17). Il est ainsi très simple d'atteindre rapidement des emplacements distants. Cette méthode est très pratique pour les grands déplacements mais permet aussi des déplacements assez précis sur de petits espaces, car lorsque les mouvements sont petits il n'y a pas ou peu de gain. Un des défauts de cette méthode est qu'elle est fatigante car il faut réaliser des mouvements assez amples avec le bras et la main.

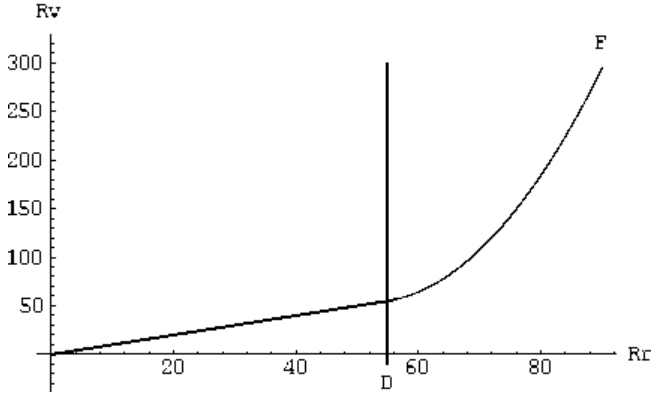


Figure 17 : Courbe des relations de distance réelle virtuelle pour les interactions de type "GoGo" [97]

Ces deux interactions pour la navigation sont des exemples pour la catégorie des interactions exo-centrées concrètes. L'utilisateur n'agit pas directement sur son avatar, ses actions agissent directement le monde autour pour réaliser le déplacement de l'avatar indirectement. Mais, ses actions restent concrètes car il s'agit d'attraper le monde et de le déplacer de façon naturelle.

iii. FPS, véhicule volant, pointage

L'interaction « First Person Shooter » se caractérise comme un contrôle de son avatar avec une caméra à la première personne (Figure 18 droite). Le contrôle s'effectue en indiquant la direction dans laquelle on souhaite se déplacer. Il est possible de réaliser des rotations en indiquant la direction dans laquelle on souhaite tourner. Les gains sur les différents paramètres d'accélération, de vitesse maximale de déplacement et de vitesse de rotation doivent être contrôlés pour ne pas dépasser un seuil d'acceptabilité à partir duquel l'utilisateur subirait très rapidement les effets du mal du simulateur. Souvent la manette de jeu est privilégiée pour ce type de contrôle. En effet, la manette est depuis longtemps utilisée pour interagir dans les jeux vidéo. Les manettes de jeu les plus couramment utilisées sont composées d'un certain nombre de boutons logiques et de deux joysticks analogiques, parfois avec deux gâchettes analogiques supplémentaires (Figure 18 gauche). Dans la pratique, les translations sont gérées par un joystick et les rotations par le second joystick. Cela permet quatre degrés de liberté. Cette méthode de navigation permet à l'utilisateur de réaliser des déplacements de précision mais n'est pas très efficace dès lors qu'il s'agit de grands environnements virtuels.

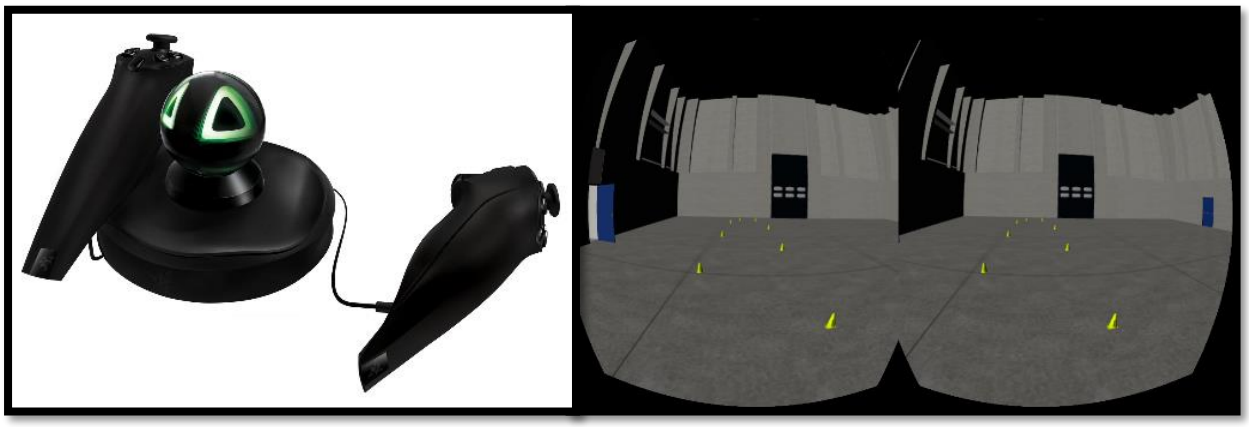


Figure 18 : Gauche : Manette Hydra de Razer / Droite : Vue à la première personne avec la déformation des lentilles de l'Oculus Rift

Le véhicule volant est une technique de navigation permettant jusqu'à six degrés de liberté. On définit la direction et la vitesse pour la translation, ou un axe et une vitesse de rotation, grâce à de simples commandes offertes par l'utilisation d'un Wand ou d'une souris 3D (Figure

19). Cette méthode est assez compliquée d'utilisation car les contrôles se font simultanément sur de nombreux degrés de liberté indépendants.



Figure 19 : Flystick

Le pointage [98] reprend le principe du véhicule volant mais le rend plus instinctif en supprimant l'interface. L'utilisateur n'a qu'à pointer la direction dans laquelle il souhaite se déplacer. Il existe trois méthodes d'indication de direction : dans la première, l'utilisateur pointe la direction de déplacement souhaitée. Dans la seconde, la direction indiquée correspond à la direction du vecteur formé par la position de la tête et celle du doigt, (l'utilisateur déplace un réticule comme le fait un joueur de jeux vidéo avec la souris). Et dans la troisième, la direction du regard est utilisée comme indication de direction de déplacement. Chacune des méthodes possède ses inconvénients et ses avantages. Pointer directement la direction avec le doigt est compliqué pour des débutants, il est difficile d'apprécier la direction pointée par rapport à la direction de déplacement voulue, mais cette méthode permet des mouvements dans toutes les directions de façon relativement dynamique. Utiliser le doigt comme un curseur est plus facile pour un novice car il voit directement la direction dans laquelle il va se déplacer, mais cette technique est plus fatigante : elle impose de garder le bras levé lors du déplacement, ce qui n'est pas très ergonomique. Enfin, la dernière méthode est très pratique pour les débutants car elle est très intuitive, mais a le gros défaut de ne pas permettre de regarder autour de soi pendant le déplacement : après avoir déterminé la direction du déplacement, il faut fixer la vitesse de déplacement le long de cette direction. Pour cela, il existe cinq modes de contrôle : vitesse constante, accélération constante, vitesse contrôlée par l'éloignement de la main, accélération contrôlée par éloignement de la main, interface physique ou bien virtuelle. Le mode vitesse constante est le plus simple, il suffit d'activer ou non le déplacement, qui est alors réalisé à vitesse constante. Ce contrôle induit cependant facilement le mal du simulateur car les accélérations et décélérations sont brutales. Le contrôle en accélération est une alternative pour cela :

lorsque le mouvement est activé, la vitesse augmente de façon linéaire jusqu'à une vitesse maximale puis diminue de même lorsque le mouvement est désactivé. Lorsque la vitesse est contrôlée par l'éloignement de la main, celle-ci augmente avec l'éloignement de la main par rapport à la tête (Figure 20). Le même principe est utilisé pour ce qui est du contrôle en accélération. Pour ce qui est du contrôle avec interface physique, l'utilisateur dispose des périphériques tels qu'une pédale, un joystick ou autre dispositif permettant de régler une vitesse ou une accélération. Enfin, lorsque l'interface est virtuelle, cela regroupe tout ce qui est interface graphique permettant de régler la vitesse ou l'accélération.

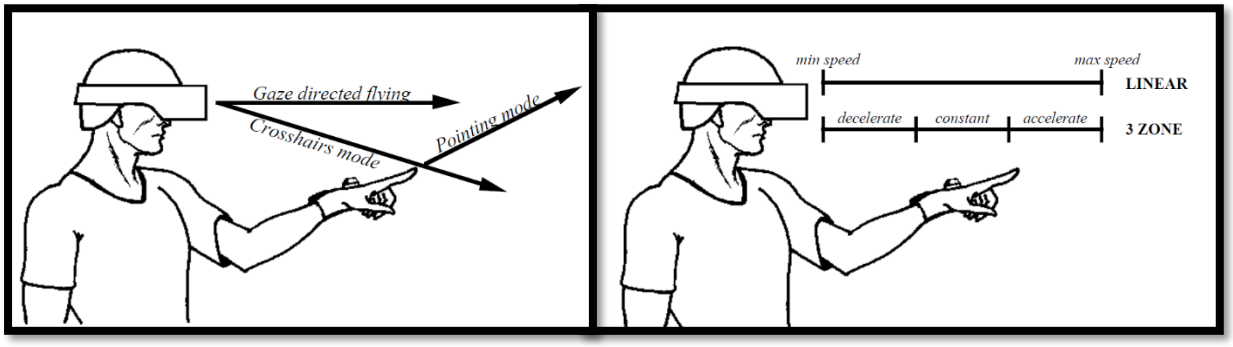


Figure 20 : Navigation par pointage avec les différents paramètres [98]

Ces interactions pour la navigation font partie de la classe égo-centrée abstraite. Les actions réalisées sont directement effectives sur l'avatar de l'utilisateur, mais elles sont abstraites dans le sens où ces actions ne sont pas représentatives directement de leurs effets dans l'environnement virtuel.

iv. Compagnon virtuel, « Target navigation », Path drawing

La méthode de navigation dite du compagnon virtuel est basée sur l'utilisation d'un guide dirigé par l'utilisateur. Cirio et al. [99] utilisent dans leur métaphore un petit oiseau bleu guidé à l'aide de rênes virtuelles (Figure 21). L'objectif est ici d'être promené dans l'environnement grâce à cet animal. L'avatar de l'utilisateur possède une relation avec l'animal à la manière d'une calèche tirée par des chevaux. Dans sa métaphore, l'oiseau de Cirio et al. est commandé avec des rênes, l'utilisateur tend les bras en avant pour faire avancer l'animal et les replie pour freiner. Chaque geste réalisé avec les rênes correspond à un ordre. Cette métaphore est très utile dans le cadre d'utilisation d'un système immersif restreint. En effet, elle permet de se déplacer dans l'environnement virtuel sans réaliser de mouvements de déplacement dans le monde réel. De même, l'animal permet de représenter les limites physiques du système. Par exemple l'oiseau devient rouge et bat des ailes fortement pour signifier à l'utilisateur que les murs du CAVE sont proches ou que l'utilisateur s'oriente de

plus en plus vers une des faces manquantes. Ainsi l'utilisateur est conscient des limites physiques mais n'est pas sorti de la simulation.

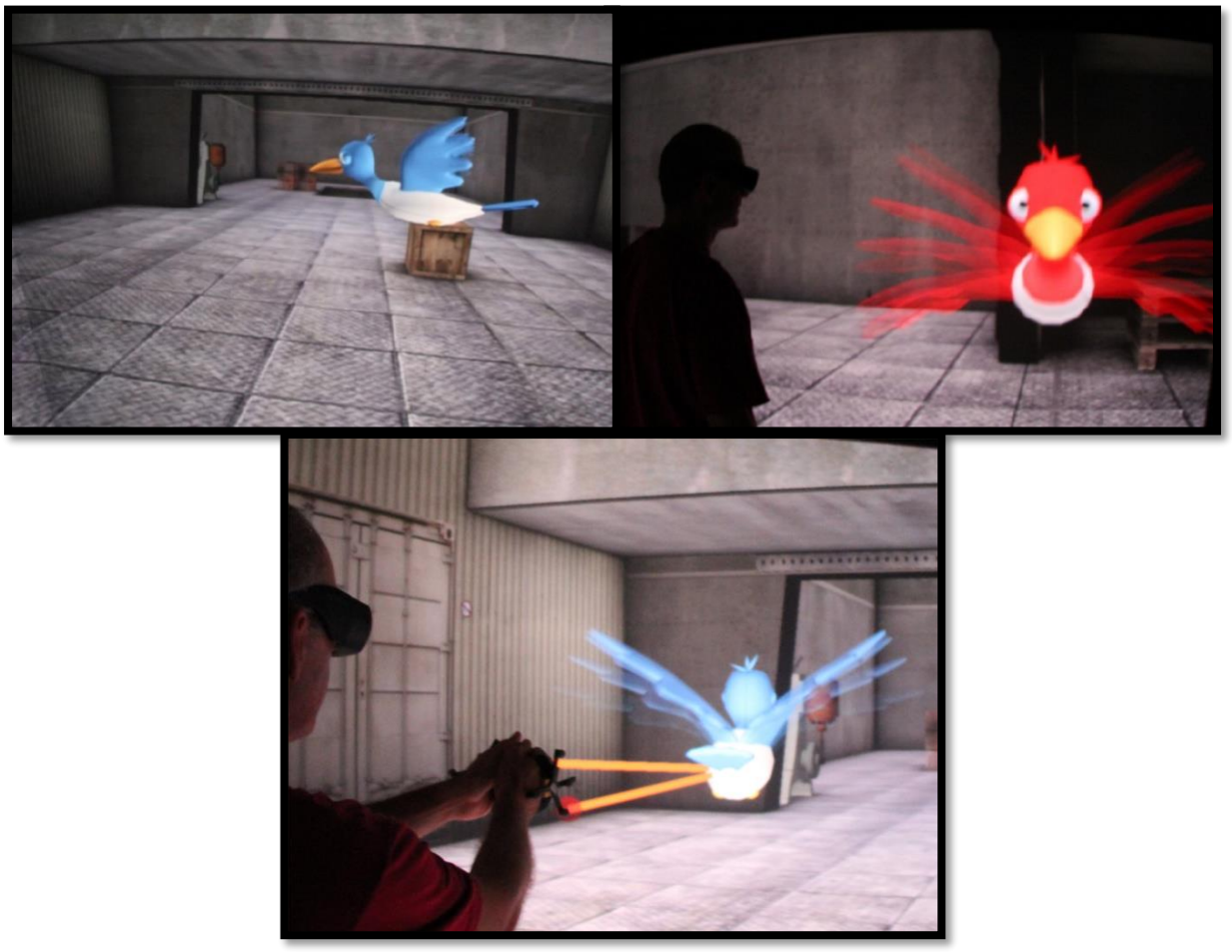


Figure 21 : Compagnon virtuel dans différentes conditions [99]

« Target navigation » est une méthode de navigation où l'utilisateur désigne par différentes méthodes l'emplacement ou le point d'intérêt où il souhaite se rendre. Ensuite, c'est l'ordinateur qui réalise la tâche de « way finding » et la tâche de déplacement suivant les paramètres déterminés. Les paramètres peuvent être de natures différentes, ils peuvent influer sur le « way finding », choisir le chemin le plus rapide, le plus court, … mais ils peuvent influer sur le déplacement en lui-même également, la vitesse de déplacement, l'accélération, les vitesses angulaires, … Bien sûr les paramètres doivent être ajustés pour générer le moins possible le mal du simulateur et troubler le moins possible le sentiment de présence. Cette méthode est très pratique car elle permet de réduire la charge cognitive liée au déplacement de l'utilisateur. Mais elle réduit le sentiment de liberté qu'il est possible de ressentir avec une méthode de déplacement libre.

Enfin, le tracé de chemin « Path drawing » ressemble au « target navigation » : ici l'utilisateur trace le chemin que son avatar va emprunter. La tâche de « wayfinding » est alors réalisée

par l'utilisateur mais le déplacement reste géré par l'ordinateur. Pour ces deux dernières méthodes de navigation, l'interface principale de l'utilisateur avec la machine est un système de pointage permettant soit de sélectionner soit de tracer. Ces interfaces peuvent être virtuelles ou réelles. Le ray-casting, le pointeur flexible, la main virtuelle, le Go-Go, les baguettes, world in miniature sont des exemples de méthodes de sélection et de pointage.

Ces trois méthodes sont des exemples d'interactions de navigation exo-centrées abstraites. L'utilisateur n'agit pas directement sur son avatar et les actions ne sont pas concrètes.

2.3. Interactions développées pour répondre à la question de recherche

Dans un premier temps, nous cherchons à ajouter des vibrations lors d'une simulation de conduite permettant d'améliorer les retours sur le déplacement et les interactions entre le véhicule et la route. Pour cela, il est nécessaire de déterminer la méthode de navigation utilisée lors de la simulation.

Dans un second temps, les vibrations que l'on souhaite apporter à la simulation ont comme objectif d'aider l'utilisateur à mieux ressentir le mouvement lors d'une simulation de marche. Cela signifie qu'il faut privilégier des méthodes d'interactions abstraites car en effet, c'est dans ces cas que le ressenti du mouvement est le plus absent. Nous développons donc une interaction égo-centrée et une autre exo-centrée. La première est de type FPS. On appelle cette méthode de navigation « Contrôle FP (First Person) en Vitesse ». La seconde méthode est du même genre que la méthode du compagnon virtuel et est donc exo-centrée. Comme notre compagnon virtuel est un papillon, cette méthode est appelée « Butterfly Navigation ».

2.3.1. Simulateur de conduite

Le simulateur de conduite mis à disposition est le Simulateur Automobile Arts et Métiers (SAAM) (Figure 22). Il se compose d'une plateforme MOOG 6 DoF sur laquelle se positionne une Twingo. Devant celle-ci se trouve un écran circulaire permettant un champ de vision de 150°. L'interaction de navigation se fait comme en réalité. L'utilisateur dispose d'un volant avec des pédales. Il agit donc comme dans une vraie voiture. Ici, la boîte de vitesse est une boîte automatique. La simulation est réalisée avec le logiciel de simulation Scaner Studio 1.1.



Figure 22 : Simulateur Automobile Arts et Métiers (SAAM)

2.3.2. Contrôle FP en Vitesse

Ce mode de contrôle permet de diriger son avatar en étant à la première personne. Le point de vue est celui de l'avatar. Le contrôle FP en vitesse s'effectue à l'aide d'une manette de jeu possédant deux joysticks. Le joystick droit permet de réaliser les translations dans l'environnement virtuel. Pour cela, il suffit d'indiquer la direction dans laquelle on souhaite se déplacer. L'inclinaison du joystick correspond à une vitesse de déplacement : plus on pousse le joystick, plus on va vite. Le gain de vitesse suit une loi carrée comme indiqué dans la Figure 23. La vitesse maximale de déplacement est de 1.7 $m.s^{-1}$.

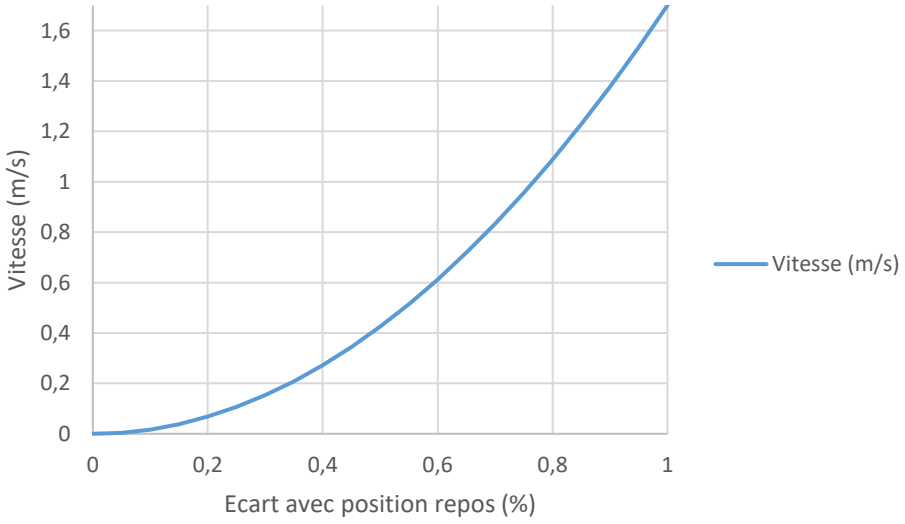


Figure 23 : Correspondance entre vitesse de déplacement et position du joystick (Contrôle FP en Vitesse)

Le joystick gauche permet de contrôler la rotation de notre avatar sur l'axe vertical. Cela permet d'orienter le corps de l'avatar dans l'environnement virtuel. De même, la rotation est progressive en fonction de la position du joystick. Mais ici, le gain est linéaire et la vitesse de rotation maximale est de 51 °.s^{-1}. La Figure 24 montre le gain en rotation.

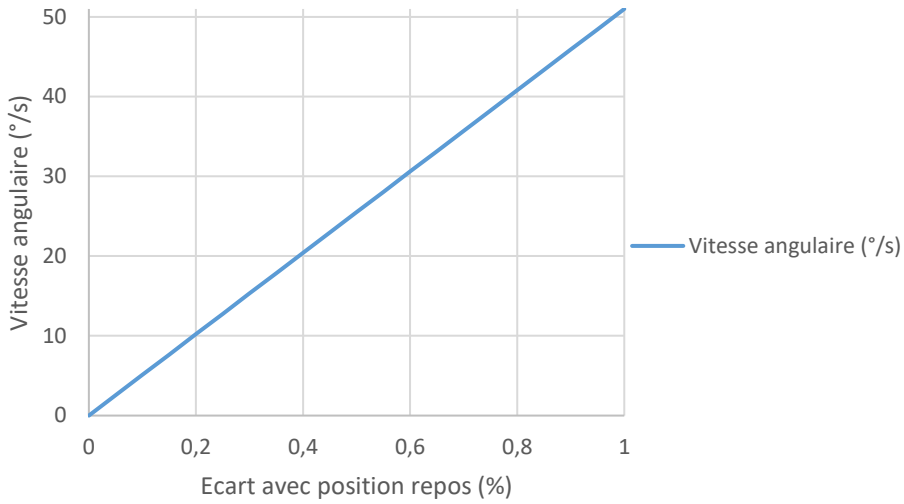


Figure 24 : Correspondance entre vitesse de rotation et position du joystick (Contrôle FP en Vitesse)

Ce contrôle en vitesse permet donc de diriger directement son avatar ; en vitesse cela induit que, lorsqu'on lâche le joystick, notre avatar s'arrête instantanément. Il n'y a pas de phénomène d'inertie.

Cette méthode de navigation permet à l'utilisateur de contrôler directement son avatar. Il gère tous les déplacements de celui-ci. Le fait qu'il n'y ait pas d'inertie rend l'avatar très réactif. La moindre action de l'utilisateur influe directement sur le comportement de l'avatar. C'est à la fois un avantage et un inconvénient. En effet, avoir le contrôle direct et instantané sur son avatar est très pratique mais pour un utilisateur débutant, s'il ne gère pas ses déplacements de façon fluide, le mal du simulateur peut apparaître rapidement à cause des changements rapides de direction et de vitesse.

2.3.3. Butterfly Navigation

Cette méthode de déplacement reprend le principe du compagnon virtuel. Ici, le compagnon est représenté par un gros papillon (Figure 25).

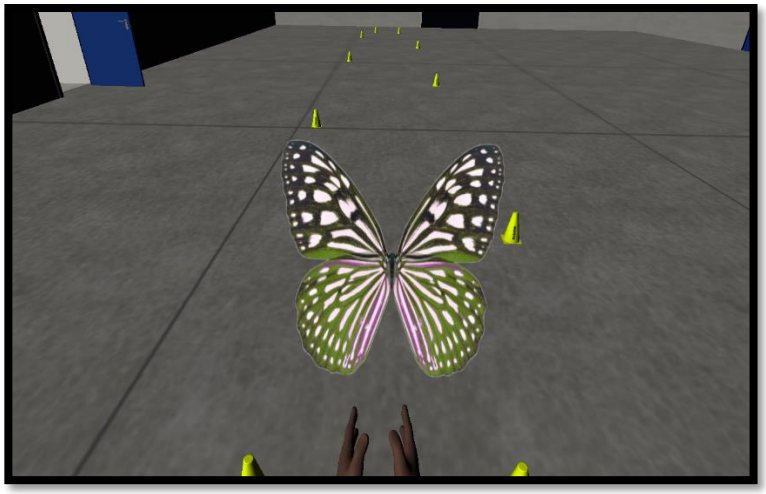


Figure 25 : Papillon comme compagnon virtuel

On contrôle donc directement le papillon qui agit sur son avatar. Pour contrôler le papillon, on utilise une manette de jeu avec deux joysticks. Le papillon est contrôlé en accélération pour les translations. C'est-à-dire qu'une position de joystick correspond à une accélération. Avec un phénomène de frottement, le papillon atteint une vitesse limite différente suivant l'accélération donnée. On utilise toujours le joystick droit pour les translations. Le gain en accélération est linéaire dans cette méthode de navigation. L'accélération maximale du compagnon est de 2 $m.s^{-2}$ et on lui applique un phénomène de frottement visqueux de coefficient λ=1.5. Ainsi, la vitesse maximale du papillon est de 1.1$m.s^{-1}$. La Figure 26 montre l'évolution de la vitesse au cours du temps pour une accélération maximale constante suivie d'une accélération nulle correspondant à l'arrêt du papillon lorsqu'on lâche le joystick.

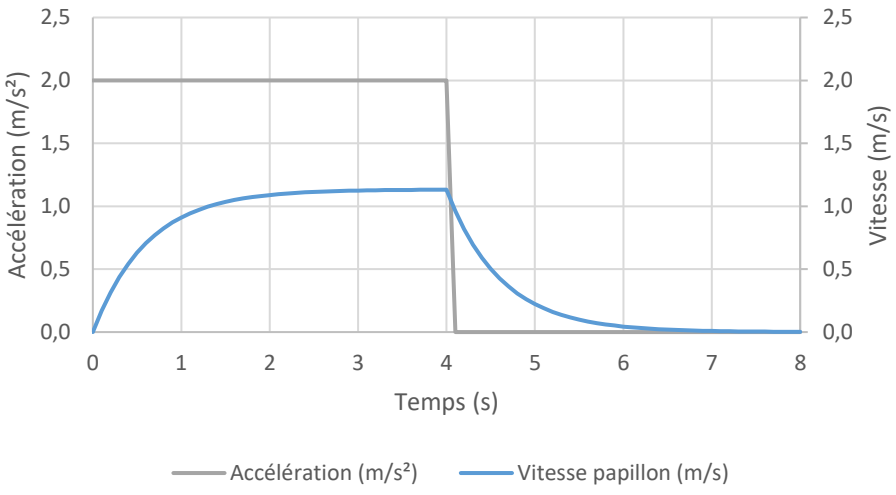


Figure 26 : Evolution de la vitesse lors d'une accélération suivie d'un arrêt

Concernant la rotation, le joystick gauche permet d'appliquer la même rotation que dans le contrôle FP en vitesse mais ici, on fait tourner le papillon.

Maintenant qu'on contrôle le papillon, l'avatar est guidé par le compagnon grâce à une relation de masse-ressort, donc le point d'accroche est positionné 1 mètre derrière le papillon. La longueur à vide du ressort est de 0 mètre et sa raideur rapportée à la masse de l'avatar est de k=4.5 N/m/Kg. Enfin, l'avatar possède sa propre inertie λ=2 (Figure 27).

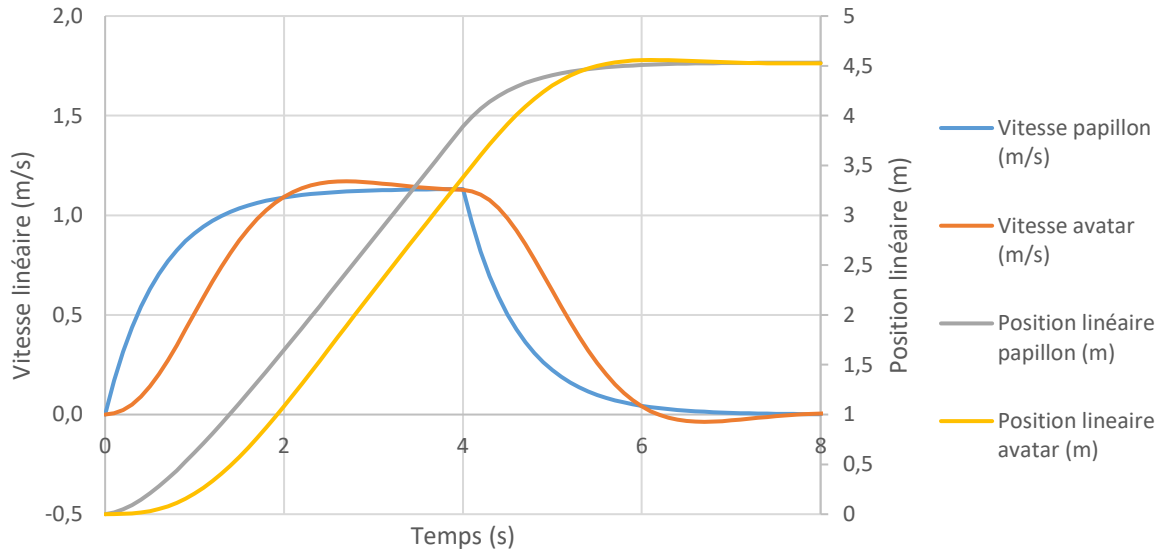


Figure 27 : Evolution de la vitesse et de la position du papillon et de l'avatar au cours du temps lors d'une accélération puis d'un arrêt

Enfin l'orientation de l'avatar est donnée par la position relative du papillon. L'avatar s'oriente en permanence dans la direction du papillon, ainsi le papillon reste toujours devant l'avatar.

Avec cette méthode de navigation, la rotation du papillon entraîne un déplacement de l'avatar.

Comme on peut le voir sur les courbes de vitesse, avec cette méthode, les déplacements de l'avatar sont lissés. La présence d'inertie rend les mouvements plus fluides. L'utilisateur agissant directement sur le compagnon n'a pas d'effet direct sur l'avatar, il peut donc en résulter un sentiment d'incapacité à contrôler l'avatar. Il est alors nécessaire d'expliquer comment fonctionne le mécanisme de contrôle à l'utilisateur pour éviter la frustration qui peut en découler.

Chapitre 3 - Expérimentations

1. Vibrations relatives à l'action de la navigation

Dans cette partie, nous traiterons l'apport de vibrations pour l'aide à la navigation lors de l'aspect action de la navigation. Dans une première expérimentation, nous orienterons les vibrations sur la navigation en simulation de conduite. Enfin, dans une seconde expérimentation, nous traiterons le cas des simulations où l'utilisateur se déplace en marchant dans l'environnement virtuel.

1.1. Simulation de conduite

1.1.1. Simulation de bandes rugueuses

Le SAAM est équipé d'un système de vibreurs (Figure 28) permettant de simuler la rugosité de la route. Les différents vibreurs permettent à l'utilisateur de percevoir au travers des vibrations le contact pneu/route. Ces vibrations permettent d'améliorer le réalisme de la simulation et le sentiment de présence [100].

Le matériel installé sur le simulateur est le suivant :
- un Clark Synthesis TST429 pour l'assise (5-17 000 Hz)
- un ButtKicker LFE pour le sol (5-200 Hz)
- un ButtKicker Gamer 2 pour les pédales (5-200 Hz)



Figure 28 : Eléments vibrants pour la simulation de conduite

Ces dispositifs permettent de transmettre les vibrations au conducteur par l'intermédiaire du siège, du sol et des pédales suivant les équations déterminées lors de l'étude sur le contact pneu/route [100] (Équation 1).

$$V_{Ground} = \frac{\left[\tanh\left(0.4 * \left(0.1 * (S - S_{lim})\right)\right) + 1\right]}{2} * \left[\frac{10}{19} * \cos(2 * \pi * 4 * t) + \frac{5}{19} * \cos(2 * \pi * 12 * t) + \frac{4}{19} * \cos(2 * \pi * 18 * t)\right]$$

$$V_{Seat} = \frac{\left[\tanh\left(0.4 * \left(0.1 * (S - S_{lim})\right)\right) + 1\right]}{2} * \left[\cos(2 * \pi * 12 * t)\right]$$

$$V_{Pedals} = \frac{\left[\tanh\left(0.4 * \left(0.1 * (S - S_{lim})\right)\right) + 1\right]}{2} * [\cos(2 * \pi * 30 * t)]$$

Avec : V_i les signaux envoyés dans les systèmes de vibrations
S la vitesse du véhicule
S_{lim} la vitesse limite de la route (représente la qualité de la route)
t le temps

Équation 1 : Equations de contrôle des vibrations du rendu du contact pneu/route (simulation de conduite)

Dans cette expérimentation, nous utilisons ce dispositif pour simuler les bandes rugueuses qu'on retrouve sur la route en présence d'une intersection ou d'une zone de danger. L'objectif de cette expérimentation est de montrer l'impact des vibrations sur le sentiment de présence dans la simulation, et de montrer l'impact de ces vibrations sur le comportement de conduite. Avec cette expérimentation, on souhaite répondre à la question suivante :

Quel est l'impact de bandes rugueuses virtuelles sur le comportement du conducteur en cas de danger ?

La plupart des vibrations ressenties par le conducteur lorsqu'il est sur la route proviennent de l'interaction des pneus avec la route. Ces vibrations dépendent de la qualité de la route et de la vitesse du véhicule mais les fréquences provenant de l'interaction pneu/route ne dépassent pas les 30Hz. [100]. Il est possible de différencier plusieurs sortes de vibrations suivant leur provenance. Les premières sont continues et sont produites majoritairement par la rugosité de la route, elles peuvent être assimilées à la qualité de la route. Cette qualité est différente suivant l'utilisation de la route. Ainsi, une route où la limitation de vitesse est haute aura une rugosité plus fine soit une meilleure qualité qu'une route où la limitation de vitesse est basse. Cela permet d'avoir des vibrations possédant des longueurs d'onde relativement constantes sur les différents revêtements, c'est pourquoi les vibrations dues à cette interaction pneu/route ont des fréquences pratiquement constantes. Le second type de vibrations provient des irrégularités présentes sur les routes telles que les nids de poules, les raccords de routes, … Ces irrégularités produisent des vibrations similaires à des chocs. Enfin, il y a des vibrations conçues pour alerter le conducteur d'un danger possible. C'est le dernier type de vibrations produites par le contact pneu/route. Ces vibrations sont produites à l'aide de bandes rugueuses. Il en existe deux types, longitudinales et transversales (Figure 29). Dans les deux cas, elles permettent la production d'un son d'alerte accompagné de fortes vibrations [101].



Figure 29 : Gauche : Bandes rugueuses longitudinales / Droite : Bandes rugueuses transversales

Les bandes rugueuses longitudinales permettent d'avertir le conducteur lorsqu'il dévie de la route. Ces bandes peuvent être positionnées sur les bords de la route pour éviter les sorties de route, mais elles peuvent également être positionnées le long des lignes médianes afin d'éviter les accidents avec les véhicules roulant dans la direction opposée [102].

Les bandes rugueuses transversales ont deux objectifs différents. Elles sont conçues soit pour avertir le conducteur d'un danger possible qui pourrait le surprendre, soit pour attirer l'attention du conducteur sur une signalétique supplémentaire indiquant un danger. Ces bandes rugueuses sont présentes dans les situations où les autres signalisations verticales et horizontales ne sont pas suffisantes pour améliorer la sécurité routière. Généralement, elles sont disposées à l'approche d'un virage dangereux, d'une intersection ou d'une zone à vitesse réduite.

Pour déterminer quel est l'impact de ces vibrations sur le comportement du conducteur, nous mettons en place le scénario suivant : les utilisateurs devront conduire la voiture sur une route avec trois intersections différentes, et lors de la dernière intersection, un cycliste passera au dernier moment devant la voiture. Si le conducteur n'anticipe pas son arrivée sur l'intersection, il heurtera le cycliste. Certains utilisateurs auront des bandes rugueuses avec un retour vibratoire sur chaque intersection tandis que les autres n'auront que le retour visuel de ces bandes. Les bandes rugueuses placées avant chaque intersection permettent au conducteur une phase d'apprentissage, les bandes rugueuses annoncent une intersection avec danger possible. Il est demandé aux participants de conduire en respectant le code de la route tout en suivant l'itinéraire indiqué.

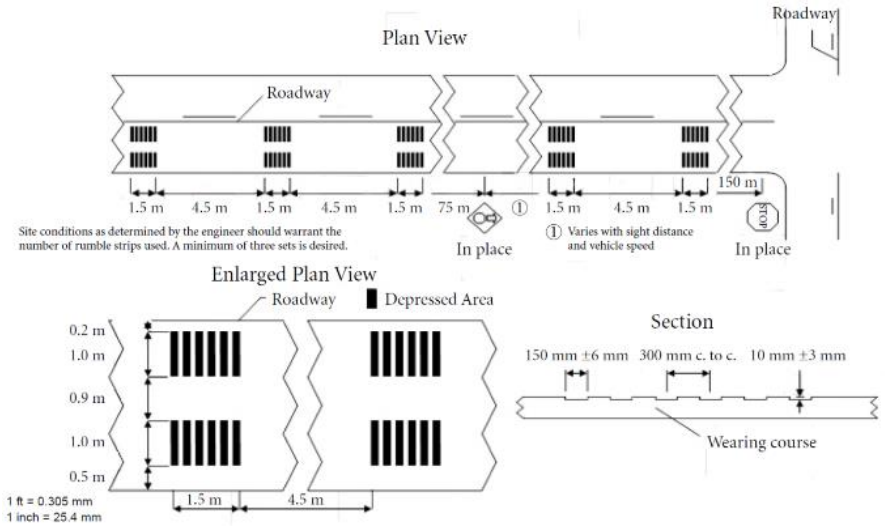


Figure 30 : Placement des bandes rugueuses transversales [103] [104].

Comme présenté sur la Figure 30, les bandes rugueuses sont positionnées avant chaque intersection dangereuse. Il y a deux séries de bandes composées de trois et deux passages vibrants. Les passages vibrants sont espacés de 4.5 m, sont longs de 1.5 m et il y a 75 m de distance entre les deux séries. Le dernier passage vibrant est positionné à 150 m avant l'intersection.

Lorsque le conducteur roule sur les bandes rugueuses, les vibreurs transmettent des vibrations fortes accompagnées du bruit caractéristique que font les bandes rugueuses lorsqu'on roule dessus. Ces deux composantes font que le conducteur perçoit ces vibrations comme de vraies bandes rugueuses. Plus il roule vite, plus les vibrations sont fortes.

1.1.2. Expérimentation

i. Protocole

Pour réaliser cette expérimentation, nous avons demandé à 10 participants de conduire dans le scénario décrit ci-dessous.

L'utilisateur conduit sur une route sur laquelle se trouvent trois intersections à risque, espacées de 5 km. La route est limitée à 70 km/h. Avant chaque intersection, se trouvent deux séries de bandes rugueuses permettant d'alerter le conducteur sur la possibilité de risques au niveau de l'intersection. Ces bandes rugueuses sont couplées à une signalisation verticale des intersections à l'aide de panneaux. La première et la dernière intersections sont des croisements tandis que la seconde intersection est un rond-point. Lorsque le conducteur arrive au niveau de la dernière intersection, un vélo coupe la route au conducteur. Le fait que le conducteur heurte ou non le cycliste est enregistré comme paramètre d'évaluation. Pour chaque intersection, on mesure la position de la pédale d'accélération, l'effort appliqué sur

la pédale de frein, la vitesse de la voiture et l'accélération de la voiture. Ces mesures sont réalisées depuis le début de la première bande rugueuse jusqu'à la fin de l'intersection. Elles permettent de déterminer le comportement du conducteur. En parallèle de ces mesures objectives, on demande aux participants de remplir un questionnaire portant sur leur perception des intersections. Le questionnaire consiste en une question où le participant doit évaluer sur une échelle de Likert à 5 niveaux sa perception de l'annonce des intersections.

Pour cette expérimentation, deux groupes de cinq participants ont réalisé ce scénario. Le premier groupe a réalisé la simulation avec les bandes rugueuses (Figure 31) tandis que le second groupe l'a réalisé sans bandes rugueuses. Dans les deux conditions, les participants ont comme consigne de conduire sur le tracé déterminé en respectant le code de la route.



Figure 31 : Bandes rugueuses positionnées avant la dernière intersection

ii. Résultats et analyses

Tous les participants sont des hommes français âgés de 24 à 43 ans. L'âge moyen du groupe sans les bandes rugueuses est de 35,8 ans avec un écart type de 8,38 et ils ont une expérience de conduite de 17,2 ans en moyenne. Pour la seconde modalité, les participants avec les bandes rugueuses ont 30,2 ans en moyenne avec un écart type de 4,66 et ils ont une expérience de conduite de 11,8 ans en moyenne.

Ils ont tous été invités à respecter le code de la route et à conduire prudemment. A la fin de la simulation, ils ont rempli le questionnaire à propos de leur perception des intersections.

On trouve ci-après les différents résultats des mesures de l'expérience réalisées dans Scaner tudio. Pour chaque intersection, la vitesse moyenne est en km/h, l'accélération moyenne est

en km/h/s, la position de la pédale d'accélération est en pourcentage et l'effort sur la pédale frein en N. Toutes ces données sont issues de Scaner Studio lors de la simulation.

Le Tableau 1 et le Tableau 2 montrent les différents résultats pour les participants ayant réalisé l'expérimentation sans les bandes rugueuses.

Tableau 1 : Résultats de la position de la pédale d'accélération et d'effort sur le frein pour la simulation sans les bandes rugueuses

Sans bandes rugueuses						
	Position moyenne de la pédale d'accélération (%)			Effort sur le frein (N)		
Participants	Intersection 1	Intersection 2	Intersection 3	Intersection 1	Intersection 2	Intersection 3
1	9%	19%	20%	0	3,3	1,8
2	16%	24%	21%	0	2,5	7,3
3	8%	14%	21%	0	0	3,2
4	18%	19%	23%	1,3	5,5	9,8
5	17%	16%	27%	0,4	1,3	4,9
Moyenne	14%	18%	22%	0,34	2,52	5,4
Ecart type	5%	4%	3%	0,56	2,1	3,2

Tableau 2 : Résultats de la vitesse et de l'accélération de la voiture pour la simulation sans les bandes rugueuses

Sans bandes rugueuses						
	Vitesse (Km/h)			Accélération (Km/h/s)		
Participants	Intersection 1	Intersection 2	Intersection 3	Intersection 1	Intersection 2	Intersection 3
1	63,2	54,7	62,9	-0,4	-1,2	-0,5
2	67,5	56,1	57,5	-0,3	-1,1	-1,5
3	59,1	38,1	42,9	-0,6	-0,8	-0,8
4	63,6	56,4	58,3	-0,4	-1,4	-1,6
5	65,8	50,6	55,7	-0,2	-0,9	-0,8
Moyenne	63,84	51,18	55,46	-0,38	-1,08	-1,04
Ecart type	3,2	7,7	7,5	0,15	0,24	0,48

Le Tableau 3 et le Tableau 4 montrent les différents résultats pour les participants ayant réalisé l'expérimentation avec les bandes rugueuses.

Tableau 3 : Résultats de la position de la pédale d'accélération et d'effort sur le frein pour la simulation avec les bandes rugueuses

Avec bandes rugueuses						
	Position moyenne de la pédale d'accélération (%)			Effort sur le frein (N)		
Participants	Intersection 1	Intersection 2	Intersection 3	Intersection 1	Intersection 2	Intersection 3
1	13%	37%	28%	0	0	5
2	9%	11%	25%	0	1,9	1,5
3	14%	23%	24%	0	2,6	3
4	19%	28%	22%	1,3	2,9	2,7
5	14%	16%	22%	4,9	4,4	5,5
Moyenne	14%	23%	24%	1,24	2,36	3,54
Ecart type	4%	10%	2%	2,1	1,6	1,7

Tableau 4 : Résultats de la vitesse et de l'accélération de la voiture pour la simulation avec les bandes rugueuses

Avec bandes rugueuses						
	Vitesse (Km/h)			Accélération (Km/h/s)		
Participants	Intersection 1	Intersection 2	Intersection 3	Intersection 1	Intersection 2	Intersection 3
1	69,9	68,8	61,2	-0,5	0	-0,7
2	61,9	50,5	48,6	-0,7	-1,1	-0,5
3	64,9	45,3	56,9	-0,3	-0,8	-0,7
4	64,9	57,2	56,4	-0,5	-1,3	-0,6
5	57,2	55,8	58,3	-0,7	-1,1	-1,1
Moyenne	63,76	55,52	56,28	-0,54	-0,86	-0,72
Ecart type	4,7	8,8	4,7	0,17	0,51	0,23

Enfin, la Figure 32 résume les moyennes des mesures objectives réalisées.

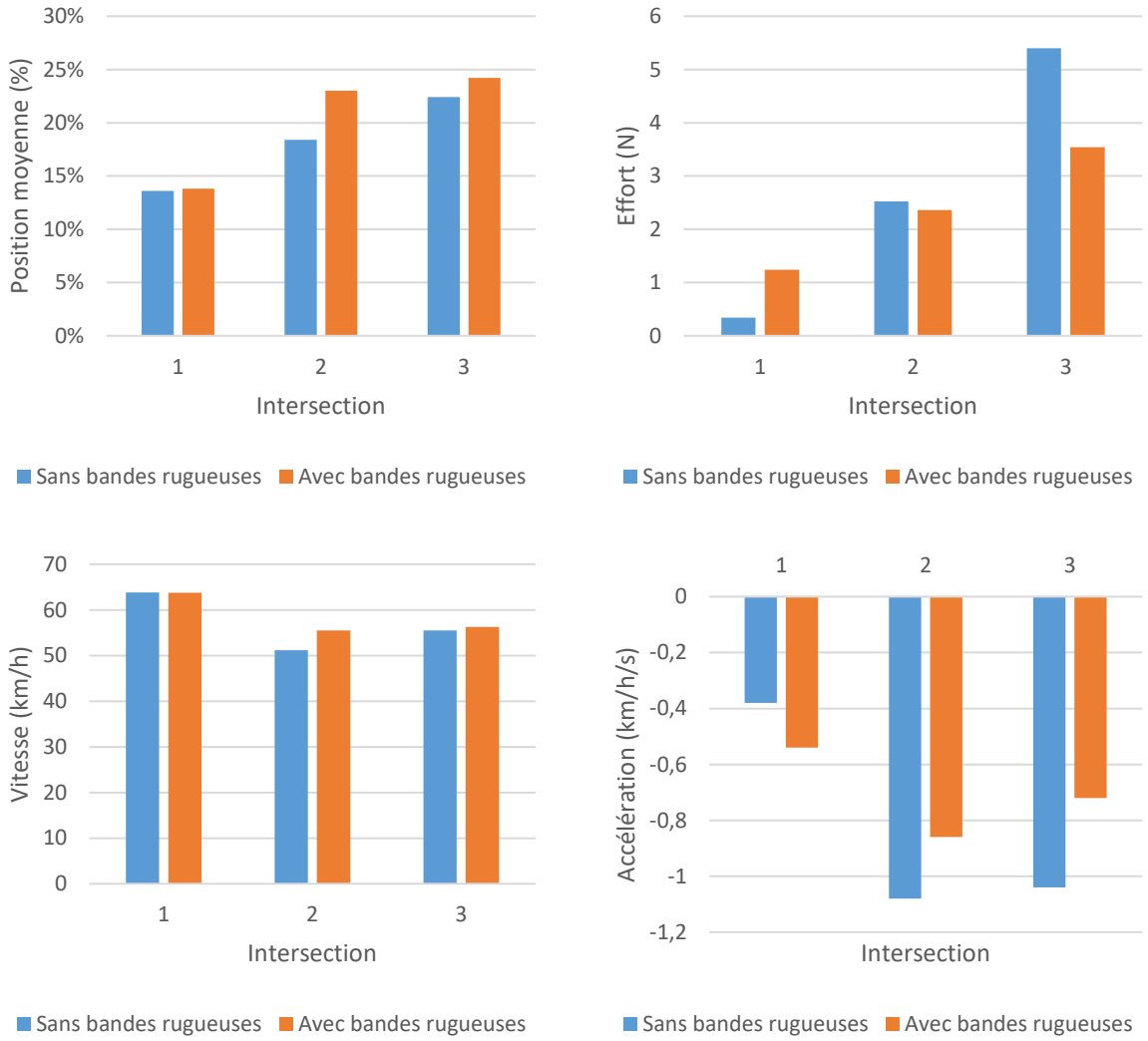


Figure 32 : Haut gauche : Position moyenne de la pédale d'accélération / Haut droit : Effort moyen sur la pédale de frein / Bas gauche : Vitesse moyenne de la voiture / Bas droit : Accélération moyenne de la voiture

Suite à l'expérimentation, les participants ont répondu au questionnaire concernant leur perception de l'annonce des intersections. Le Tableau 5 et le Tableau 6 montrent les informations concernant les participants à propos de leur âge et de leur expérience de conduite ainsi que le ressenti par rapport à l'annonce des intersections sur une échelle de Likert à 5 niveaux.

Tableau 5 : Résultats du questionnaire sur la perception de l'annonce des intersections sans les bandes rugueuses

Sans bandes rugueuses			
Participants	Age	Expériences de conduite (années)	Perception de l'annonce des intersections (0->4)
1	30	13	1
2	42	24	2
3	24	5	1
4	43	22	4
5	40	22	3
Moyenne	36	17,2	2,2
Ecart type	8,4	8,0	1,3

Tableau 6 : Résultats du questionnaire sur la perception de l'annonce des intersections avec les bandes rugueuses

Avec bandes rugueuses			
Participants	Age	Expériences de conduite (années)	Perception de l'annonce des intersections (0->4)
1	31	13	3
2	24	6	3
3	37	19	1
4	30	11	3
5	29	10	3
Moyenne	30	11,8	2,6
Ecart type	4,7	4,8	0,9

Comme le montrent les résultats, pour chaque intersection, la vitesse moyenne d'approche est pratiquement la même que ce soit avec ou sans les bandes rugueuses. En revanche, on peut noter que les participants freinent moins fort en présence des bandes rugueuses pour les deux dernières intersections. La différence de freinage entre les deux modalités est même plus grande pour le dernier croisement. Pour la première intersection, on peut considérer qu'elle représente la phase d'apprentissage du mécanisme des bandes rugueuses. Suite à cette intersection, les participants qui réalisent l'expérimentation avec les bandes rugueuses assimilent celles-ci à l'approche d'une intersection avec un danger potentiel. Ils freinent plus fort sur cette intersection car les bandes rugueuses les surprennent.

Enfin dans le cas de la simulation sans les bandes rugueuses, 3 des participants ont heurté le cycliste tandis qu'avec les bandes rugueuses aucun des participants n'a eu d'accident.

Pour finir, la perception de l'annonce des intersections est légèrement différente entre les deux modalités. On s'aperçoit que sans les bandes rugueuses, la perception de l'annonce des intersections est plus variable tandis qu'avec les bandes rugueuses, celle-ci est relativement la même pour tous les participants.

iii. Conclusion

Les résultats montrent qu'il y a un apprentissage des bandes rugueuses, au fur et à mesure des intersections, les conducteurs sont plus prudents avec les bandes rugueuses. Ils anticipent le danger c'est la raison pour laquelle dans le cas avec les bandes rugueuses, aucun participant n'a touché le cycliste malgré le fait qu'ils aient freiné moins fort.

D'un autre côté, les bandes rugueuses n'ont pas d'impact sur la vitesse moyenne au niveau des intersections tandis que si on regarde les études réalisées sur le terrain, la vitesse moyenne sur les zones équipées de bandes rugueuses diminue. Ce qui peut être dû au fait que les retours sensoriels concernant la vitesse diffèrent entre le réel et la réalité virtuelle.

On peut conclure que les bandes rugueuses rendent le conducteur plus attentif aux évènements dans la simulation et lui permettent d'être plus prudent. Les bandes rugueuses ainsi simulées permettent d'indiquer la présence de dangers potentiels au conducteur de façon efficace.

1.2. Vibrations pour le déplacement et simulation de marche

La réalité virtuelle rend possible l'immersion d'utilisateurs dans un environnement virtuel leur permettant de se déplacer. Pour cela, comme décrit précédemment, il existe différentes méthodes d'interaction. Suivant le type d'interaction choisi, l'utilisateur a des retours sensoriels plus ou moins importants sur son déplacement, allant du visuel seulement à un retour kinesthésique complet. L'objectif des systèmes vibratoires mis en place dans la suite de cette partie est de définir différentes modalités vibratoires qui permettent d'ajouter des retours sensoriels sur le déplacement lorsque l'interaction de navigation ne permet qu'un retour visuel et auditif. La première modalité est basée sur le principe de proprioception, et utilisera des vibrations proprioceptives. La seconde modalité amènera une métaphore de pas à l'aide de vibrations synchronisées sur le rythme de la marche de l'avatar. Enfin, la dernière modalité utilisera des vibrations continues, celles-ci auront comme objectif d'augmenter l'impression de vection. Par la suite, on déterminera deux expérimentations permettant de comparer l'effet de ces différentes modalités vibratoires en fonction des deux méthodes de navigation explicitées dans le chapitre précédent.

1.2.1. Modalités vibratoires

i. Vibrations proprioceptives

Le mécanisme d'illusions proprioceptives liées aux vibrations proprioceptives est lent, il est donc impossible de donner l'illusion du mouvement des jambes lors de la marche. En effet, ces mouvements sont trop rapides pour que l'illusion sur chaque muscle puisse apparaître. On va donc donnée l'illusion d'une action continue présente tout au long du mouvement de marche.

Comme vu précédemment, pendant la marche, le centre de masse se déplace en permanence vers l'avant. Il est donc intéressant de donner une illusion de déséquilibre vers l'avant avec les vibrations proprioceptives qui correspondrait à ce déplacement vers l'avant. En étudiant l'anatomie des membres inférieurs, il s'avère que le grand fessier (gluteus maximus) est le muscle qui permet la stabilisation du bassin en s'opposant à l'action du muscle ilio-psoas (Figure 33). Ils sont antagonistes l'un de l'autre. Il est donc possible de donner une illusion d'un léger déséquilibre vers l'avant en stimulant le grand fessier à l'aide de vibrations proprioceptives.

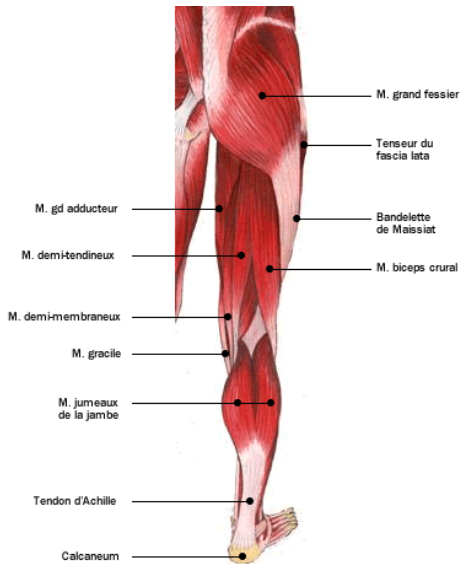


Figure 33 : Anatomie postérieure de la jambe

Pour appliquer ce type de vibrations en temps réel dans une application de réalité virtuelle, il a fallu développer un dispositif vibratoire. Le système conçu est composé de deux boîtiers vibrants, d'une carte de commande et d'une alimentation stabilisée. La carte de commande est une carte Arduino UNO branchée en USB sur l'ordinateur. Celle-ci reçoit les ordres d'activation des moteurs permettant les vibrations et les exécute. La carte de commande est alors connectée à une carte de puissance où se trouve un relais mécanique permettant

d'alimenter les moteurs en puissance (Figure 34). Les moteurs sélectionnés pour appliquer les vibrations sont des Uni Vibe 345-002.

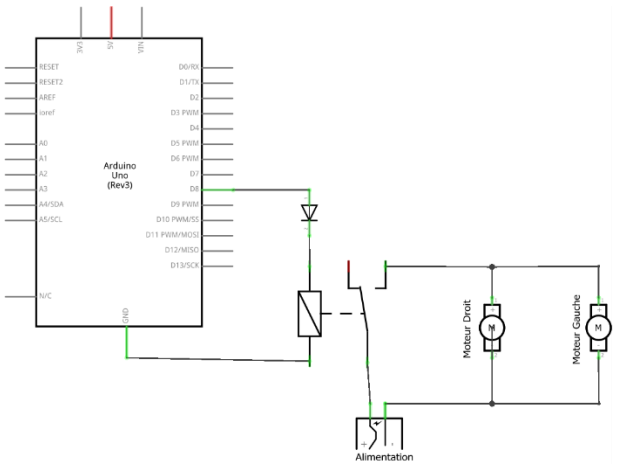


Figure 34 : Schéma de commande des moteurs pour les vibrations proprioceptives

Ces moteurs possèdent une masse excentrée et sont alimentés de sorte qu'ils produisent des vibrations à une fréquence de 80 Hz avec une amplitude de déplacement de 0.8 mm (Figure 35).

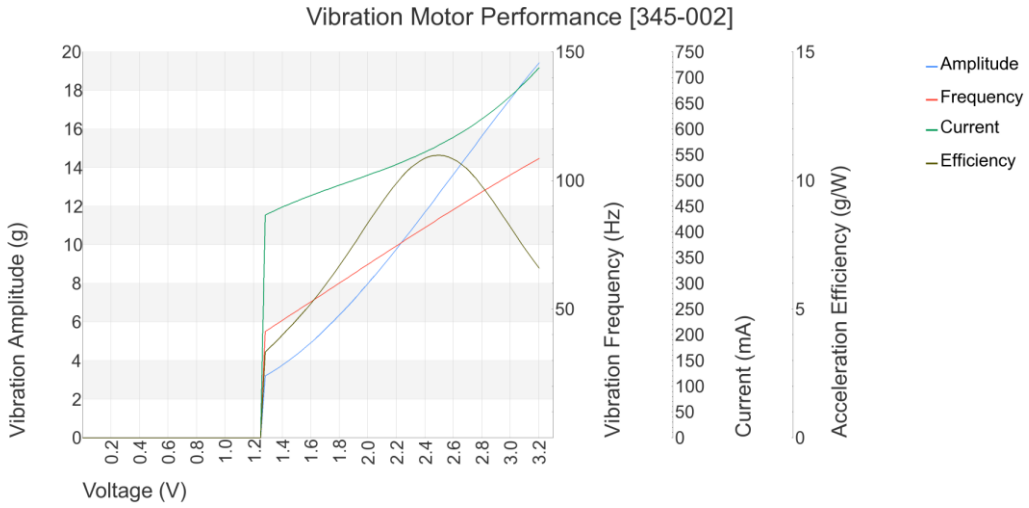


Figure 35 : Courbes caractéristiques des moteurs Uni Vibe 345-002

Les boîtiers sont fixés sur les jambes pour être en contact avec la partie basse des grands fessiers. Les vibrations permettent alors de transmettre une illusion proprioceptive au niveau du grand fessier (Figure 36).



Figure 36 : Dispositif de vibrations proprioceptives

Pour que l'illusion fonctionne, l'utilisateur doit être immergé sans pouvoir voir son corps ; il est donc nécessaire d'utiliser un casque de réalité virtuelle de type Oculus Rift. Lorsque l'utilisateur se déplace dans l'environnement virtuel, les vibrations s'activent. L'utilisateur se voit alors en mouvement, et grâce au mouvement du visuel et au bruit de pas, il assimile ce déplacement à de la marche. Ces retours sensoriels couplés aux vibrations permettent alors l'illusion proprioceptive. Le cerveau perçoit un léger déséquilibre vers l'avant lorsque l'avatar se déplace dans l'environnement virtuel.

Le déséquilibre ressenti devrait alors permettre de mieux comprendre le déplacement dans l'environnement virtuel. Ainsi, cela devrait réduire le mal du simulateur et améliorer le sentiment de présence ressenti durant l'immersion.

ii. Vibrations Synchronisées sur le pas

La seconde modalité mise en place a pour objectif de créer une métaphore permettant d'avoir l'information de la pose du pied dans l'environnement virtuel par l'intermédiaire de vibrations appliquées sur les chevilles. Pour mettre en place ces vibrations, les dispositifs utilisés sont des bracelets Vibrotac de Sensodrive (Figure 37). Ces bracelets fonctionnent en Bluetooth. Ils sont constitués de six vibreurs indépendants de type moteur à masse excentrée comme les « pico vibe » de Precisionmicrodrives. Chaque moteur peut être activé indépendamment. Ils peuvent être commandés en intensité de vibration et en temps d'activation.



Figure 37 : Vibrotac et positionnement des bracelets sur les chevilles

L'analyse de la marche permet de déterminer le rythme de pas moyen en fonction de la vitesse de déplacement. En reprenant l'analyse de la marche précédente, on définit la longueur d'un pas en mètres comme la distance parcourue par le pied oscillant pendant la phase de simple appui. On définit ensuite la cadence comme le nombre de pas par unité de temps. Elle est exprimée en pas.min^{-1}. Enfin, la vitesse de marche est la distance parcourue par unité de temps en m.s^{-1}. Hirasaki et al. [105] déterminent la cadence moyenne en fonction de la vitesse de marche. Ils obtiennent la relation exposée sur la Figure 38.

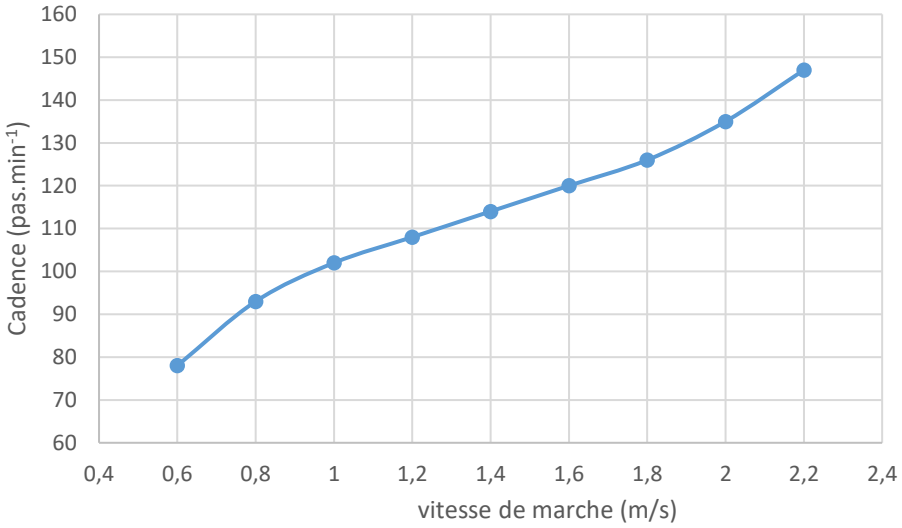


Figure 38 : Correspondance entre cadence et vitesse de marche adaptée des travaux d'Hirasaki

Pour simuler le pas dans l'environnement virtuel, les bracelets sont positionnés sur les chevilles de l'utilisateur juste au-dessus de la malléole. Cela permet de rapprocher les vibrations de leur source virtuelle qu'est le contact du pied virtuel avec le sol de l'environnement virtuel. Lorsque le pied virtuel gauche touche le sol, c'est le bracelet sur la cheville gauche qui vibre et inversement pour le pied droit. Lors du début du contact du pied, les six moteurs du bracelet concerné sont activés pendant 200 ms avec une intensité proportionnelle à la vitesse de marche et avec une intensité de 50% lorsque la vitesse de marche est maximale. L'intensité des vibrations est limitée à 50% car avec une intensité supérieure, les vibrations sont trop fortes. Ces vibrations ont alors pour objectif de donner une information à l'utilisateur sur les chocs entre ses pieds virtuels et le sol. Elles devraient donner des informations supplémentaires sur la vitesse de marche par rapport à un retour uniquement visuel et auditif, ce qui pourrait avoir un impact positif sur le sentiment de présence et le mal du simulateur.

iii. Vibrations continues

La dernière modalité vibratoire concernant l'aspect actif de la navigation est l'utilisation de vibrations continues. Ces vibrations ont pour objectif de matérialiser la vection engendrée par le visuel lorsque l'utilisateur se déplace dans l'environnement virtuel. Les bracelets vibrants sont utilisés ici aussi pour appliquer les vibrations. Ils sont positionnés de la même manière que pour les vibrations synchronisées sur le pas. Les six moteurs des deux bracelets sont activés simultanément lorsque l'utilisateur est en mouvement dans l'environnement virtuel. L'amplitude des vibrations est proportionnelle à la vitesse de marche avec une intensité de 50% lorsque la vitesse de marche est maximale. Comme pour les vibrations

synchronisées sur le pas, l'intensité est limitée à 50% car les vibrations seraient trop fortes et inconfortables pour l'utilisateur avec une intensité plus élevée.

1.2.2. Expérimentations

Les trois modalités vibratoires ont pour objectif d'apporter des améliorations au niveau du mal du simulateur, du sentiment de présence, ainsi que sur les performances de navigation de l'utilisateur. Il faut maintenant déterminer quels sont leurs effets sur ces paramètres. Les vibrations affectent directement l'utilisateur tandis que la méthode de navigation n'agit pas systématiquement sur l'avatar. Il est donc intéressant de vérifier l'effet des différentes modalités vibratoires avec les deux méthodes de navigation citées dans le chapitre précédent. Ainsi, nous pourrons observer l'effet de ces vibrations pour une méthode de navigation abstraite égo-centrée et une méthode de navigation abstraite exo-centrée.

Nous élaborons donc une première expérimentation concernant le Contrôle FP en Vitesse, puis une seconde avec le Butterfly Navigation.

i. Contrôle FP en Vitesse

Dans cette première expérimentation, nous voulons déterminer les effets des vibrations proprioceptives, des vibrations synchronisées sur le pas et des vibrations continues sur les différents aspects que sont le mal du simulateur, le sentiment de présence et les performances de navigation. Pour cela, le scénario suivant est mis en place.

a. Scénario

L'objectif de la simulation est de faire se déplacer l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Pour cela, la première partie de l'expérimentation est constituée d'un parc dans lequel se trouve un chemin en gravier (Figure 39). Ce chemin permet à l'utilisateur de se promener. Cette promenade lui permet de se familiariser avec les mécanismes de la méthode de navigation utilisée et de s'immerger dans l'environnement virtuel. Une seconde partie de la simulation se déroule en intérieur et permet d'évaluer les performances de navigation de l'utilisateur. Les performances de navigation sont évaluées à l'aide d'un slalom que l'utilisateur doit réaliser. Il est possible de mesurer la précision de navigation de l'utilisateur ainsi que son temps de parcours qui représentent les paramètres de performance de navigation.



Figure 39: Parcours dans le parc

Le chemin dans le parc est entouré d'arbres et de quelques bâtiments. Des bancs sont mis en place à espacement régulier. Le slalom est réalisé à l'aide de cônes de sport jaunes virtuels. Ces cônes sont disposés de part et d'autre d'une ligne médiane à une distance d'1 mètre de cette ligne et espacés de 3 mètres dans le sens longitudinal (Figure 40). Cela représente les positions extrêmes d'une sinusoïdale d'amplitude 1 mètre et de période 6 mètres.

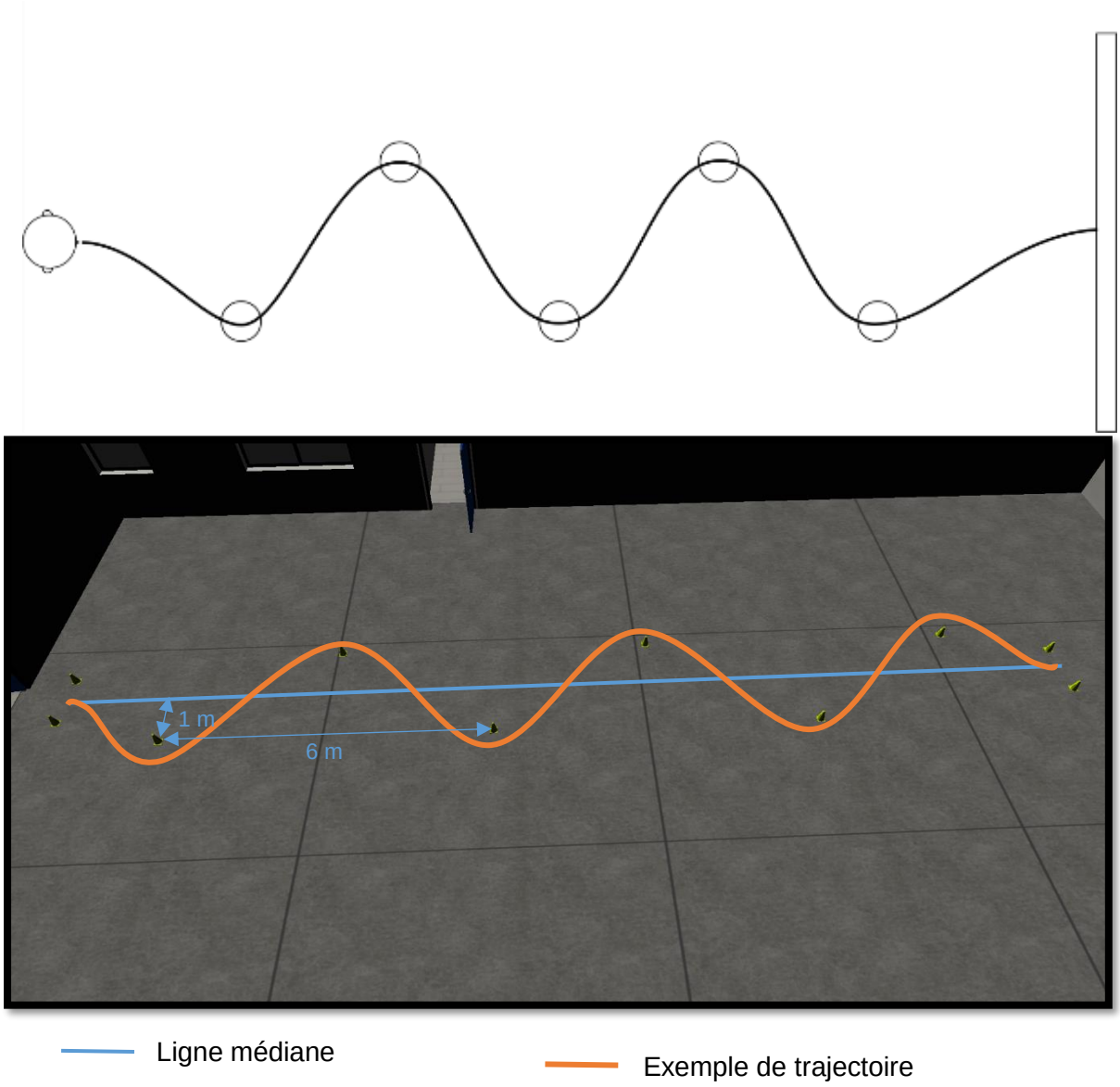


Figure 40 : Slalom

b. Protocole expérimental

L'immersion est réalisée à l'aide de l'Oculus Rift Development Kit 1 couplé à un casque audio stéréo Philips. Pour naviguer, les participants utilisent des manettes Hydra de Razor.

L'expérimentation se déroule en 4 parties. Chaque partie comprend une des modalités suivantes : sans vibrations, vibrations proprioceptives, vibrations synchronisées sur le pas et vibrations continues. Comme l'immersion entraîne le mal du simulateur et que nous souhaitons le mesurer afin de le comparer pour chaque modalité, les participants doivent réaliser les 4 parties espacées au minimum d'un jour. Cela permet d'avoir des résultats indépendants concernant le mal du simulateur. Les modalités sont réalisées dans un ordre aléatoire pour éviter le biais que pourrait apporter l'apprentissage. En effet, le mal du

simulateur, le sentiment de présence et les performances s'améliorent avec l'expérience. Aussi, nous changeons l'ordre des modalités d'un participant à l'autre.

Chaque participant se voit remettre un document texte expliquant le déroulement de l'expérimentation. Après la lecture de celui-ci, il est alors expliqué oralement pour s'assurer de la bonne compréhension. Avant la première simulation, les participants remplissent un questionnaire préliminaire où ils renseignent leurs nom, prénom, âge, profession et expérience en jeux vidéo. Ils remplissent aussi le Questionnaire de Propension à l'Immersion. Pour chaque modalité, avant la simulation, les participants remplissent le questionnaire sur le mal du simulateur pour déterminer leur degré de mal-être avant la simulation. Ensuite, suivant la modalité, les participants sont équipés du système vibrant. On procède alors à une mesure de stabilité posturale. Cette mesure est réalisée avec une plateforme Stabilotest avec le logiciel médical PostureWin Plateforme. Le participant doit se tenir debout sur ses deux pieds et rester en équilibre naturel les bras le long du corps en regardant devant lui. La mesure dure 51,2 secondes à un taux d'échantillonnage de 40 Hz. Cette mesure permet de déterminer la surface de stabilité du participant avant la simulation. Ensuite, la méthode de navigation est expliquée au participant. Celui-ci se promène alors pendant 2 minutes sur le chemin en graviers dans le parc. Cela lui permet de prendre en main la méthode de navigation mais cette promenade virtuelle permet aussi la mise en place du mal du simulateur. Suite à ces 2 minutes, l'avatar du participant est alors téléporté dans l'espace intérieur devant le slalom. Le participant doit alors réaliser le slalom 2 fois. Pendant le deuxième essai, nous mesurerons l'écart de position entre la trajectoire de référence et la trajectoire réalisée par le participant ainsi que le temps mis pour réaliser le parcours. La simulation prend fin lorsque le participant arrive à la fin du slalom pour la deuxième fois. On réalise alors une nouvelle mesure de stabilité avant de déséquiper le participant du matériel de vibration. Le participant remplit alors le questionnaire sur le mal du simulateur, le questionnaire sur l'état de présence et enfin le questionnaire sur le retour d'expérience portant sur son ressenti des vibrations. Ce questionnaire est composé de deux questions à échelle de Likert à trois niveaux (Pas du tout / Peu / Beaucoup). Les questions sont les suivantes :

- Les vibrations étaient-elles dérangeantes ?
- Les vibrations donnaient-elles une indication sur le déplacement ?

c. Résultats et analyses

L'expérimentation a été réalisée avec 18 participants. Deux participants n'ont pas suivi les consignes données en début d'expérimentation et deux autres étaient trop sujets au mal du simulateur et n'ont pu finir l'expérimentation du fait de leur mal-être. Ces 4 participants sont

donc écartés pour la suite des résultats et de leurs analyses. Ce qui ramène le nombre de participants à 14, âgés de 18 à 49 ans. Sur les 14 participants, 3 sont des femmes et les 11 autres des hommes. La capacité d'immersion moyenne des participants, donnée par le Questionnaire de Propension à l'Immersion, est de 72 avec un écart type de 14. Et la moitié des participants n'avaient pas d'expérience dans le domaine de la réalité virtuelle.

Les Tableaux 7 à 12 montrent les résultats du questionnaire sur l'état de présence pour les différents participants pour chaque modalité vibratoire.

Tableau 7 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Présence totale

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations proprioceptives**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations continues**
1	101	98	114	110
2	99	100	107	95
3	75	85	84	82
4	99	96	102	100
5	87	84	93	90
6	83	95	87	90
7	113	113	115	103
8	107	95	107	101
9	91	89	101	90
10	91	92	94	91
11	114	114	114	114
12	105	84	113	113
13	95	100	100	99
14	114	125	127	122
Moyenne	98	98	104	100
Ecart-type	12	12	12	11

Tableau 8 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous échelle Réalisme

Participants	**sans vibrations**	**vibrations proprioceptives**	**vibrations Synchronisées sur le pas**	**vibrations continues**
1	31	22	33	31
2	38	32	39	27
3	19	27	24	22
4	28	30	31	29
5	19	14	21	19
6	22	29	23	25
7	38	38	35	31
8	28	25	28	26
9	32	28	36	29
10	22	25	26	21
11	42	42	42	42
12	38	27	37	39
13	21	27	26	24
14	40	44	47	44
Moyenne	30	29	32	29
Ecart-type	8	8	8	8

Tableau 9 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous échelle Possibilité d'Agir

Participants	**sans vibrations**	**vibrations proprioceptives**	**vibrations Synchronisées sur le pas**	**vibrations continues**
1	19	19	25	25
2	17	22	22	22
3	10	13	11	10
4	23	22	23	23
5	18	17	20	18
6	14	17	14	16
7	21	22	22	22
8	23	19	23	22
9	20	19	23	19
10	14	15	13	13
11	25	25	25	25
12	22	18	26	26
13	19	23	21	19
14	21	26	25	24
Moyenne	19	20	21	20
Ecart-type	4	4	5	5

Tableau 10 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous échelle Qualité de l'Interface

Participants	***sans vibrations***	***vibrations proprioceptives***	***vibrations Synchronisées sur le pas***	***vibrations continues***
1	25	25	22	22
2	24	24	24	24
3	27	24	28	28
4	24	23	24	24
5	27	27	26	27
6	23	23	24	23
7	27	29	28	28
8	25	25	25	25
9	22	20	20	22
10	24	25	25	26
11	23	23	23	23
12	23	24	22	23
13	28	26	28	30
14	24	21	22	23
Moyenne	25	24	24	25
Ecart-type	2	2	2	3

Tableau 11 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous Echelle Auto-Evaluation de la Performance

Participants	**sans vibrations**	**vibrations proprioceptives**	**vibrations Synchronisées sur le pas**	**vibrations continues**
1	5	11	13	11
2	10	12	12	12
3	8	9	9	10
4	12	12	12	12
5	11	12	13	13
6	11	11	11	11
7	10	13	11	12
8	13	13	13	13
9	12	13	13	13
10	11	11	11	12
11	9	9	9	9
12	12	10	13	13
13	10	11	8	9
14	9	14	13	11
Moyenne	10	12	12	12
Ecart-type	2	2	2	1

Tableau 12 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous échelle Auditif

Participants	**sans vibrations**	**vibrations proprioceptives**	**vibrations Synchronisées sur le pas**	**vibrations continues**
1	21	21	21	21
2	10	10	10	10
3	11	12	12	12
4	12	9	12	12
5	12	14	13	13
6	13	15	15	15
7	17	11	19	10
8	18	13	18	15
9	5	9	9	7
10	20	16	19	19
11	15	15	15	15
12	10	5	15	12
13	17	13	17	17
14	20	20	20	20
Moyenne	14	13	15	14
Ecart-type	5	4	4	4

Les Tableaux 13 à 15 montrent les résultats du questionnaire sur le mal du simulateur pour les différents participants pour chaque modalité vibratoire.

Tableau 13 : Résultats du Questionnaire sur le Mal du Simulateur / Total

Participants	**sans vibrations**	**vibrations proprioceptives**	**vibrations Synchronisées sur le pas**	**vibrations continues**
1	10	9	3	3
2	0	0	0	0
3	14	2	14	10
4	1	1	1	1
5	6	3	0	0
6	7	3	5	4
7	9	6	6	11
8	11	9	11	14
9	9	8	2	7
10	2	2	0	1
11	1	0	0	1
12	9	6	2	3
13	13	9	12	14
14	4	0	0	1
Moyenne	7	4	4	5
Ecart-type	5	4	5	5

Tableau 14 : Résultats du Questionnaire sur le Mal du Simulateur / Sous échelle Nausée

Participants	**sans vibrations**	**vibrations proprioceptives**	**vibrations Synchronisées sur le pas**	**vibrations continues**
1	8	6	0	1
2	0	0	0	0
3	5	0	7	4
4	1	1	1	1
5	4	2	0	0
6	2	1	2	2
7	2	1	1	3
8	6	4	6	7
9	2	3	1	2
10	2	2	0	1
11	1	0	0	1
12	5	3	1	1
13	8	4	6	7
14	2	0	0	0
Moyenne	3	2	2	2
Ecart-type	3	2	3	2

Tableau 15 : Résultats du Questionnaire sur le Mal du Simulateur / Sous échelle Oculo-moteur

Participants	**sans vibrations**	**vibrations proprioceptives**	**vibrations Synchronisées sur le pas**	**vibrations continues**
1	2	3	3	2
2	0	0	0	0
3	9	2	7	6
4	0	0	0	0
5	2	1	0	0
6	5	2	3	2
7	7	5	5	8
8	5	5	5	7
9	7	5	1	5
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
Moyenne	3	2	2	2
Ecart-type	3	2	2	3

Le Tableau 16 présente les résultats de stabilité posturale des différents participants pour chaque modalité vibratoire.

Tableau 16 : Résultats des écarts de stabilité avant et après simulation en mm²

Participants	**sans vibrations**	**vibrations proprioceptives**	**vibrations Synchronisées sur le pas**	**vibrations continues**
1	73,41	43,44	166,23	324,25
2	62,35	1,42	23,49	25,48
3	50,48	22,44	9,68	39,52
4	24,49	80,96	127,45	6,93
5	31,04	75,78	0,31	12,09
6	122,79	6,77	27,75	20,6
7	97,83	45,87	110,73	62,56
8	174,59	37,59	118,72	74,88
9	42,45	93,58	21,46	5,31
10	86,37	58,75	14,06	268,82
11	95,32	28,76	105,25	24,35
12	58,53	7,97	17,96	39,9
13	78,56	2,08	33,02	77,21
14	113,52	0,55	132,66	21,8
Moyenne	79,41	36,14	64,91	71,69
Ecart-type	40,26	31,71	57,78	98,62

Enfin les Tableaux 17 et 18 montrent les indices de performance que sont le temps de réalisation du slalom et la précision de suivi de trajectoire des différents participants pour chaque modalité vibratoire.

Tableau 17 : Résultats du temps de réalisation du slalom en secondes

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations proprioceptives**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations continues**
1	25,115	26,783	20,14	27,617
2	14,032	14,749	17,083	14,5531
3	14,555	18,567	26,177	18,613
4	12,465	12,303	12,282	13,16
5	19,599	20,115	15,636	14,398
6	14,322	15,005	14,231	12,987
7	16,155	13,599	20,232	12,893
8	17,166	18,431	18,532	17,194
9	14,033	14,732	14,698	14,703
10	13,797	13,145	13,815	13,447
11	13,165	13,184	13,183	13,036
12	24,845	27,153	15,95	27,19
13	30,147	15,865	34,502	23,315
14	31,496	15,467	21,083	23,031
Moyenne	18,64	17,08	18,40	17,58
Ecart-type	6,54	4,75	5,98	5,44

Tableau 18 : Résultats des surfaces entre trajectoire de référence et trajectoire réalisée en m²

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations proprioceptives**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations continues**
1	27,293	17,014	13,999	17,163
2	5,648	10,794	8,491	8,245
3	12,497	14,255	17,01	16,032
4	6,525	5,119	4,47	6,455
5	15,207	12,927	12,931	9,22
6	9,391	9,613	5,849	5,404
7	13,736	7,807	12,379	6,941
8	16,149	19,245	17,1	15,243
9	7,403	10,666	13,993	9,901
10	7,691	6,404	7,758	7,545
11	4,527	5,794	4,604	5,614
12	6,822	9,919	6,986	9,369
13	29,364	10,415	25,669	16,513
14	16,212	11,652	19,674	9,759
Moyenne	12,75	10,83	12,21	10,24
Ecart-type	7,72	4,07	6,26	4,20

Afin d'analyser ces résultats, il est nécessaire de comparer les moyennes des différents résultats et de réaliser des tests statistiques pour vérifier si les différences notées sont significatives ou non. Lorsque les données respectent les conditions de distribution normale et d'équivalence des variances, nous utiliserons le test de Student pour des échantillons appariés sinon, nous utiliserons le test non paramétrique de Wilcoxon pour des échantillons appariés.

Concernant le score de présence, la Figure 41 montre les moyennes des scores de présence totale pour les différentes modalités. On observe que les vibrations continues et les vibrations synchronisées semblent avoir un effet positif sur le sentiment de présence globale par rapport à la simulation sans vibrations.

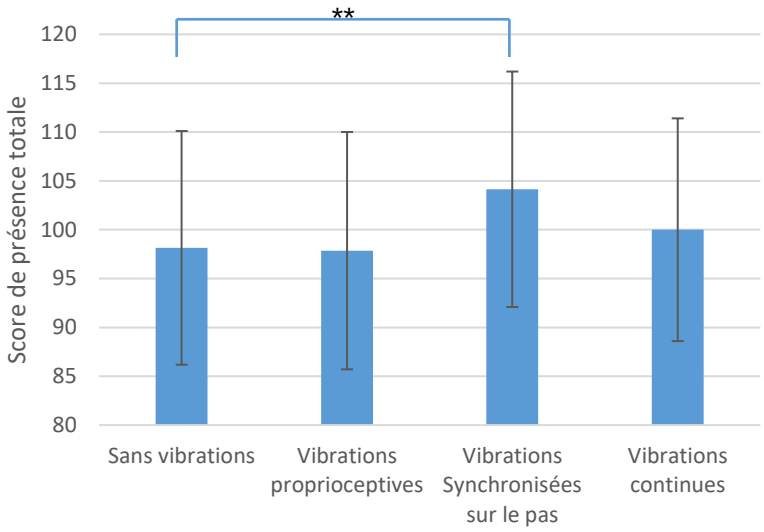


Figure 41 : Moyennes des scores de présence globale pour chaque modalité

Les échantillons respectant les conditions paramétriques du test de Student apparié, nous pouvons réaliser ce test pour déterminer si ces différences sont significatives ou non. Le test nous donne un p-value de p=0.00017 entre la modalité sans vibrations et la modalité de vibrations synchronisées sur le pas. La différence entre les résultats est donc significative. De même, le test nous donne une p-value de p=0.252 pour la différence entre les deux modalités n'est donc pas significative. Après avoir réalisé un test d'équivalence, on montre même que ces résultats sont équivalents avec une p-value de p=0.038. De même, le test d'équivalence retourne un résultat positif avec une p-value de p=0.021 lorsqu'il est réalisé entre les modalités sans vibrations et avec vibrations proprioceptives.

On n'observe donc aucun impact des vibrations proprioceptives et des vibrations continues sur le sentiment de présence. En revanche, les vibrations synchronisées sur le pas affectent de façon très significative ce sentiment de présence globale et l'améliore. On peut pousser la comparaison plus loin en regardant les différentes sous-échelles (Figure 42) que sont le réalisme, la possibilité d'agir, la qualité de l'interface, l'auto-évaluation de la performance et l'auditif.

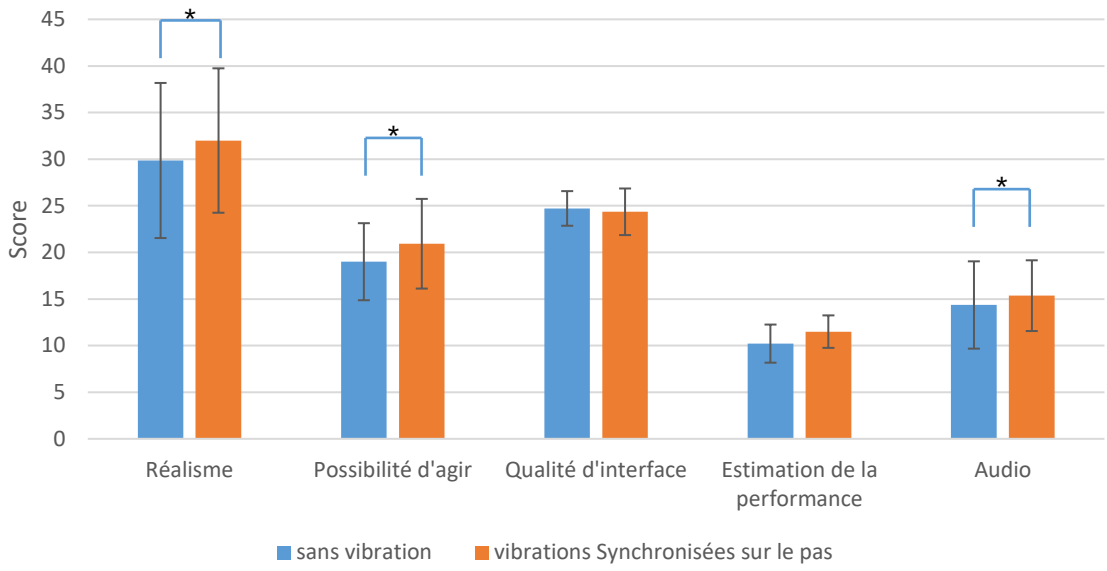


Figure 42 : Scores des différents paramètres du sentiment de présence

En réalisant le test de Student apparié sur les différentes sous-échelles, on obtient les p-values suivantes p=0.011, p=0.005, p=0.315, p=0.063 et p=0.047 pour les sous-échelles respectives. On observe donc une différence significative pour les facteurs réalisme, possibilité d'agir et auditif. En revanche, les différences ne sont pas significatives pour les autres résultats. Mais lorsqu'on réalise le test d'équivalence, on obtient une p-value de p=0.002 pour la qualité de l'interface et p=0.012 pour la sous-échelle de l'auto-évaluation de la performance. On en déduit que ces résultats sont équivalents quelles que soient les modalités.

Les vibrations synchronisées sur le pas affectent donc le réalisme perçu de la simulation, la sensation de possibilité d'agir et le retour auditif de l'utilisateur dans une simulation en immersion avec une méthode de navigation abstraite égo-centrée.

Concernant le mal du simulateur, la Figure 43 montre les moyennes du score total pour les différentes modalités.

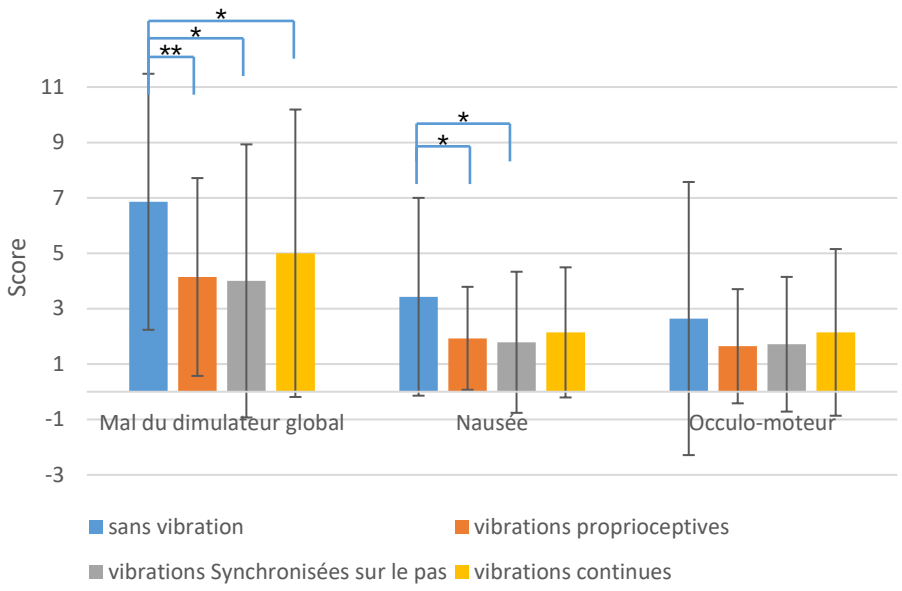


Figure 43 : Moyennes des scores du questionnaire sur le mal du simulateur

On observe donc une amélioration au niveau du mal du simulateur avec toutes les modalités vibratoires. Il faut maintenant vérifier si ces différences sont significatives en réalisant les tests statistiques. En réalisant les tests de Student appariés sur les données pour comparer les modalités vibratoires avec la modalité sans vibrations, on obtient les p-values suivantes : p=0.006, p=0.02 et p=0.044 respectivement pour les modalités de vibrations proprioceptives, vibrations synchronisées sur le pas et vibrations continues. Les trois modalités ont donc un effet positif sur le mal du simulateur.

En réalisant les tests sur les différentes sous-échelles, on obtient un impact significatif pour les vibrations proprioceptives et celles synchronisées sur le pas pour la sous-échelle concernant la nausée, avec des p-values respectives p=0.004 et p=0.025, mais l'effet des vibrations continues sur cette sous-échelle n'est qu'une tendance avec une p–value p=0.054. Concernant la sous-échelle oculo-moteur, les tests de Student appariés ne donnent pas de p-values inférieures à 0.05 ; les différences ne sont donc pas significatives.

On peut compléter les résultats du questionnaire sur le mal du simulateur avec les résultats provenant de la mesure de la stabilité. La Figure 44 montre les différences entre les modalités vibratoires pour les résultats de la stabilité posturale.

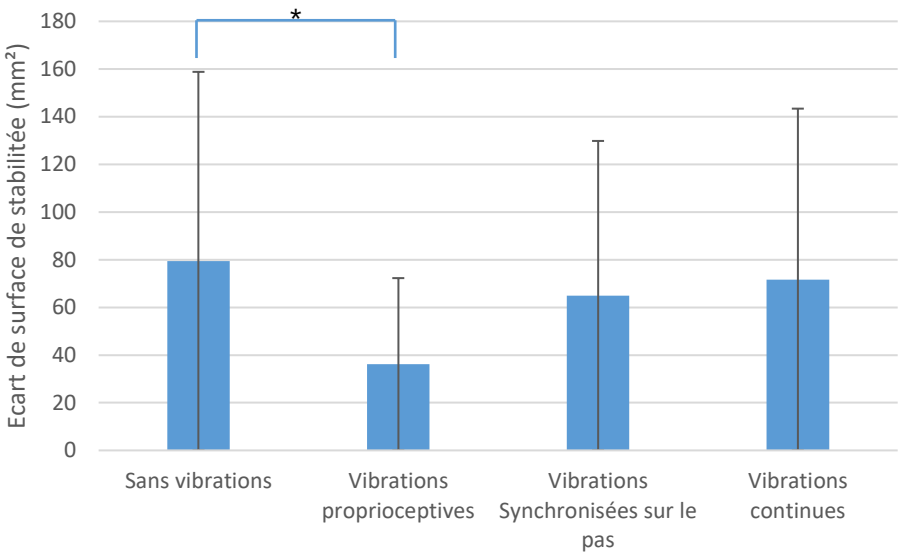


Figure 44 : Résultats des moyennes d'écart de surface de stabilité

On observe que l'écart de stabilité diminue avec les modalités vibratoires ; après avoir réalisé les tests de Student appariés, on obtient les p-values suivantes : p=0.02, p=0.06 et p=0.838. La différence entre les écarts de surface de stabilité de la simulation avec les vibrations proprioceptives et la simulation sans vibrations est significative. Cela confirme les résultats du questionnaire sur le mal du simulateur. En revanche, concernant les vibrations synchronisées sur le pas, la probabilité que la différence soit significative n'est pas assez élevée. On obtient tout de même une tendance à être significativement différente. Une expérimentation avec un échantillon plus grand pourrait permettre de clarifier cette tendance, surtout que les résultats du questionnaire sur le mal du simulateur sont positifs et donnent des résultats significativement différents. Pour ce qui est des vibrations continues, la différence est non significative, on peut donc admettre que le niveau de mal du simulateur est approximativement le même avec cette modalité vibratoire que sans les vibrations.

Enfin, concernant la performance de navigation, les résultats présentés dans la Figure 45 montrent des performances globalement identiques pour ce qui est du temps et de la précision. La réalisation des tests statistiques montre que les différences ne sont pas significatives.

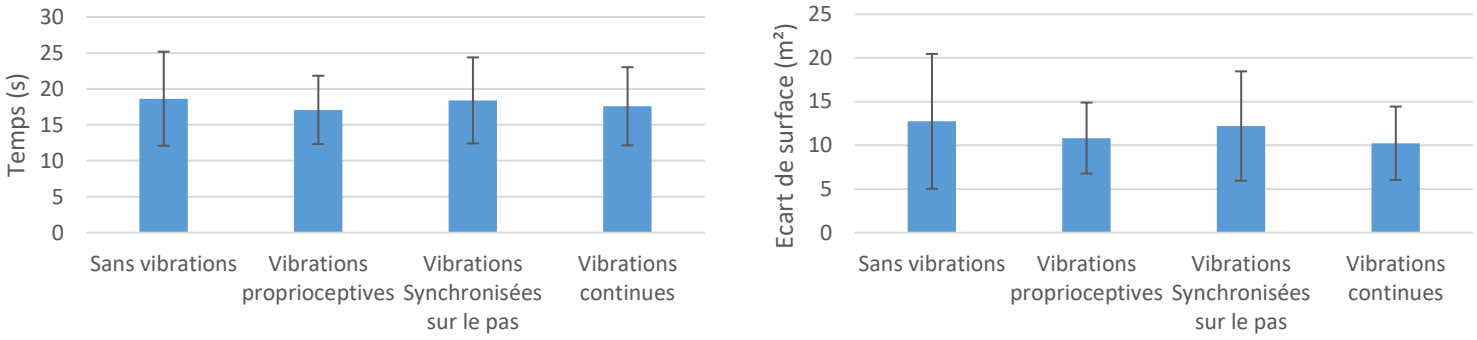


Figure 45 : Résultats moyens des indices de performance de navigation

d. Conclusion

L'expérimentation permet d'obtenir des résultats intéressants. Les différentes modalités vibratoires ont des effets différents sur l'expérience de réalité virtuelle vécue par les participants.

Les vibrations proprioceptives permettent de réduire le mal du simulateur de façon significative. En effet, les résultats du questionnaire sur le mal du simulateur sont confirmés par les résultats des mesures objectives de la stabilité posturale. En revanche, dans notre cas, elles n'affectent pas le sentiment de présence ni les performances de navigation ce qui est intéressant dans le sens où cela signifie qu'elles apportent une amélioration sans gêner les autres paramètres de l'immersion. De même, les résultats du questionnaire sur la perception des vibrations proprioceptives indiquent que les vibrations sont peu dérangeantes. Avec 10 participants indiquant que les vibrations proprioceptives étaient peu dérangeantes et les 4 autres indiquant qu'elles n'étaient pas du tout dérangeantes.

Les vibrations synchronisées sur le pas ont des effets différents des vibrations proprioceptives. Elles augmentent le sentiment de présence de façon significative surtout pour ce qui est du réalisme, de la possibilité d'agir et du retour auditif. Concernant le mal du simulateur, les résultats sont plus mitigés. Le mal du simulateur ressenti est diminué de façon significative mais les mesures objectives ne mettent en avant qu'une tendance. On peut tout de même admettre que l'effet sur le mal du simulateur est bon et que cette modalité vibratoire permet de diminuer légèrement celui-ci. Enfin, les vibrations synchronisées sur le pas n'influencent pas les performances de navigation pour ce qui est de la précision et de la rapidité. Ce qui signifie qu'utiliser ces vibrations apporte des avantages sur le sentiment de présence et le mal du simulateur sans influencer les performances de navigation.

Enfin, les conclusions sur les vibrations continues sont moins intéressantes. En effet, elles permettent d'améliorer le sentiment de présence comme le font les vibrations synchronisées sur le pas mais leur impact est moins important. On trouve le même constat avec les résultats

du questionnaire sur le mal du simulateur. L'effet sur le mal du simulateur ressenti est moins important. Les résultats objectifs confirment cela en indiquant même qu'il n'y a pas de différence significative entre la modalité de vibrations continues et la modalité sans vibrations. De plus, les résultats du questionnaire sur la perception des vibrations indiquent que ces vibrations dérangeaient beaucoup et ne donnaient que peu d'informations sur le mouvement.

Il faut garder en tête que ces résultats sont vrais pour la méthode de navigation utilisée ici, c'est-à-dire une méthode abstraite égo-centrée.

L'expérimentation suivante explore les effets des modalités des vibrations proprioceptives et des vibrations synchronisées sur le pas avec une méthode de navigation abstraite exo-centrée. En effet, ces vibrations sont appliquées directement sur l'utilisateur et dans le premier cas, le contrôle pour la navigation implique un contrôle direct de son avatar dans l'environnement virtuel. On peut donc vérifier l'effet de ces vibrations lorsque le contrôle de navigation est déporté. Pour la prochaine expérimentation, les vibrations continues ne seront pas explorées car celles-ci dérangent de façon trop importante l'utilisateur.

ii. Butterfly Navigation

De même que pour l'expérimentation précédente, l'objectif de cette étude est de déterminer les effets des vibrations proprioceptives et des vibrations synchronisées sur le pas, sur le mal du simulateur, le sentiment de présence et les performances de navigation. Nous décidons de ne pas évaluer les vibrations continues car les résultats précédents montrent que celles-ci dérangent trop l'utilisateur.

La différence avec l'expérimentation précédente réside dans la méthode de navigation. Ces modalités vibratoires sont étudiées dans le cas d'une méthode de navigation abstraite exo-centrée. Le scenario mis en place est le suivant.

a. Scénario

L'objectif de la simulation est identique à celui de la simulation de l'expérimentation précédente. Il faut amener l'utilisateur à se déplacer dans l'environnement virtuel. Nous reprenons donc le même environnement virtuel que précédemment. Celui-ci est composé de deux zones, la première est constituée d'un parc permettant de se promener sur un chemin de graviers pour permettre à l'utilisateur de s'immerger dans le monde virtuel et d'apprendre la méthode de navigation. La seconde zone est en intérieur. Elle permet d'évaluer les performances de navigation de l'utilisateur pour ce qui est de la précision et du temps de parcours grâce au slalom.

Le chemin dans le parc est entouré d'arbres et de quelques bâtiments. Des bancs sont mis en place à espacement régulier. Le slalom est réalisé à l'aide de cônes de sport jaunes virtuels. Ces cônes sont disposés de part et d'autre d'une ligne médiane à une distance d'1 mètre de cette ligne et espacés de 3 mètres dans le sens longitudinal. Cela représente les positions extrêmes d'une sinusoïdale d'amplitude 1 mètre et de période 6 mètres (Figure 40).

b. Protocole expérimental

L'immersion est réalisée à l'aide de l'Oculus Rift Development Kit 1 couplé à un casque audio stéréo Philips. Pour naviguer, les participants utilisent des manettes Hydra de Razor.

L'expérimentation se déroule en 3 parties. Chaque partie comprend une des modalités suivantes : sans vibrations, vibrations proprioceptives et vibrations synchronisées sur le pas. Comme l'immersion entraîne le mal du simulateur et que nous souhaitons le mesurer afin de le comparer pour chaque modalité, les participants doivent respecter un délai minimal d'un jour entre deux parties. Cela permet d'avoir des résultats indépendants concernant le mal du simulateur. Les modalités sont réalisées dans un ordre aléatoire pour éviter le biais que pourrait apporter l'apprentissage. En effet, le mal du simulateur, le sentiment de présence et les performances s'améliorent avec l'expérience. Aussi, nous changeons l'ordre des modalités d'un participant à l'autre.

Chaque participant se voit remettre un document texte expliquant le déroulement de l'expérimentation. Après la lecture de celui-ci ce déroulement est alors expliqué oralement pour s'assurer de la bonne compréhension.

Avant la première simulation, les participants remplissent un questionnaire préliminaire où ils renseignent leurs nom, prénom, âge, profession et expérience en jeux vidéo. Ils remplissent aussi le Questionnaire de Propension à l'Immersion. Pour chaque modalité, avant la simulation, les participants sont équipés d'un bracelet « E4 » d'Empatica (Figure 46) permettant de mesurer la conductance de la peau tout au long de l'expérimentation. Cette mesure permettra de déterminer le niveau du mal du simulateur. Le bracelet permet la mesure de la conductance de la peau en micro siemens (µS) à un taux d'échantillonnage de 4 Hz.



Figure 46 : Bracelet E4 d'Empatica

Ensuite, ils remplissent le questionnaire sur le mal du simulateur pour déterminer leur degré de mal-être avant la simulation. Par la suite, suivant la modalité, les participants sont équipés du système vibrant. On procède alors à une mesure de stabilité posturale. Cette mesure est réalisée avec une plateforme Stabilotest munie du logiciel médical PostureWin Plateforme. Le participant doit se tenir debout sur ses deux pieds et rester en équilibre naturel les bras le long du corps en regardant devant lui. La mesure dure 51,2 secondes à un taux d'échantillonnage de 40 Hz.

Le participant peut alors débuter la simulation. Il commence par se promener pendant 2 minutes dans le parc pour apprendre la méthode de navigation et s'immerger dans le monde virtuel. Ces 2 minutes de navigation permettent aussi de mettre en place le mal du simulateur. Ensuite l'avatar est transporté devant le slalom. Le participant doit réaliser le parcours 3 fois et nous réalisons les mesures de performance de navigation sur le troisième essai. Nous mesurons l'écart de position par rapport à une trajectoire théorique ainsi que le temps de réalisation du parcours.

On réalise alors une nouvelle mesure de stabilité avant de déséquiper le participant du matériel de vibration. Le participant remplit alors le questionnaire sur le mal du simulateur, le questionnaire sur l'état de présence et enfin le questionnaire sur le retour d'expérience portant sur son ressenti des vibrations. Ce questionnaire est composé de deux questions à échelle de Likert à trois niveaux (Pas du tout / Peu / Beaucoup). Les questions sont les suivantes :

- Les vibrations étaient-elles dérangeantes ?
- Les vibrations donnaient-elles une indication sur le déplacement ?

c. Résultats et analyses

L'expérimentation a été réalisée avec 14 participants. Un participant est devenu trop malade pour finir les simulations, nous utiliserons donc les résultats des 13 participants restants. Les participants étaient tous de sexe masculin et âgés en moyenne de 30 ans. La capacité d'immersion moyenne des participants, fournie par le Questionnaire de Propension à l'Immersion, est de 83 avec un écart type de 12.

Les Tableaux 19 à 25 montrent les résultats du questionnaire sur l'état de présence pour les 13 participants pour chaque modalité.

Tableau 19 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Présence totale

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	121	127	112
2	103	90	94
3	116	122	117
4	125	137	136
5	127	144	125
6	131	125	110
7	87	102	94
8	101	108	98
9	114	115	109
10	110	105	104
11	97	112	115
12	101	106	101
13	99	99	103
Moyenne	110	115	109
Ecart-type	13	16	12

Tableau 20 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous-échelle Réalisme

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	28	32	31
2	28	22	24
3	39	37	37
4	37	41	43
5	39	48	39
6	45	37	29
7	21	25	25
8	31	33	32
9	29	36	35
10	32	33	31
11	27	33	36
12	26	30	22
13	25	28	26
Moyenne	31	33	32
Ecart-type	7	7	6

Tableau 21 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous-échelle Possibilité d'Agir

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	26	27	22
2	19	19	19
3	21	24	24
4	27	26	25
5	20	27	23
6	26	26	25
7	18	21	20
8	23	22	21
9	24	22	22
10	20	18	19
11	17	21	20
12	19	18	18
13	18	19	20
Moyenne	21	22	21
Ecart-type	3	3	2

Tableau 22 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous-échelle Qualité de l'Interface

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	19	21	16
2	16	13	14
3	15	17	18
4	20	19	20
5	19	20	18
6	17	18	19
7	15	16	14
8	12	16	14
9	18	16	16
10	14	14	16
11	15	16	15
12	15	15	16
13	14	13	16
Moyenne	16	16	16
Ecart-type	2	3	2

Tableau 23 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous-échelle Possibilité d'Agir

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	16	17	18
2	17	13	13
3	16	16	18
4	15	20	18
5	18	19	18
6	19	15	17
7	9	14	10
8	15	15	11
9	14	12	13
10	14	14	13
11	13	14	15
12	15	17	18
13	15	17	17
Moyenne	15	16	15
Ecart-type	2	2	3

Tableau 24 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous-Echelle Auto-Evaluation de la Performance

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	14	14	14
2	10	10	11
3	9	11	12
4	13	13	13
5	11	13	10
6	12	13	13
7	8	10	9
8	10	12	10
9	14	14	14
10	13	13	12
11	14	10	13
12	8	10	11
13	12	12	10
Moyenne	11	12	12
Ecart-type	2	2	2

Tableau 25 : Résultats du Questionnaire sur l'Etat de Présence / Sous-échelle Auditif

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	14	14	14
2	10	10	11
3	9	11	12
4	13	13	13
5	11	13	10
6	12	13	13
7	8	10	9
8	10	12	10
9	13	13	12
10	14	10	13
11	12	12	10
12	12	12	10
13	10	10	11
Moyenne	11	12	11
Ecart-type	2	1	2

Les Tableaux 26 à 28 montrent les résultats concernant le questionnaire sur le mal du simulateur pour les 13 participants pour chaque modalité.

Tableau 26 : Résultats du Questionnaire sur le Mal du Simulateur / Total

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	4	0	0
2	6	0	1
3	1	0	2
4	7	3	6
5	4	2	0
6	0	0	0
7	6	8	2
8	2	0	3
9	1	1	3
10	2	4	1
11	0	0	2
12	2	0	3
13	2	1	4
Moyenne	3	1	2
Ecart-type	2	2	2

Tableau 27 : Résultats du Questionnaire sur le Mal du Simulateur / Sous-échelle Nausée

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	3	0	0
2	2	0	1
3	1	0	1
4	4	2	4
5	1	1	0
6	0	0	0
7	5	7	1
8	1	0	1
9	1	1	0
10	1	1	0
11	0	0	0
12	2	0	3
13	1	0	0
Moyenne	2	1	1
Ecart-type	1	2	1

Tableau 28 : Résultats du Questionnaire sur le Mal du Simulateur / Sous-échelle Oculo-moteur

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	1	0	0
2	4	0	0
3	0	0	1
4	3	1	2
5	3	1	0
6	0	0	0
7	1	1	1
8	1	0	2
9	0	0	3
10	1	3	1
11	0	0	2
12	0	0	0
13	1	1	4
Moyenne	1	1	1
Ecart-type	1	1	1

La conductance de la peau permet de mesurer le degré de mal-être du participant [106]. Elle augmente naturellement lors de la simulation. Lorsque l'utilisateur n'est pas malade, le niveau de conductance de la peau redescend alors à sa valeur initiale. On calcule donc un indice de mal-être supérieur à 1. Cet indice est calculé comme suit :

$$i_{EDA} = \frac{Condutance\ maximale - Conductance\ initiale}{Conductance\ maximale - Conductance\ finale}$$

Plus l'indice est grand, plus l'utilisateur est malade. Un utilisateur non affecté par le mal du simulateur obtient un indice de 1.

Le Tableau 29 montre les indices du mal du simulateur obtenus à l'aide des mesures de la conductance de la peau.

Tableau 29 : Résultat de la mesure de la conductance de la peau

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	1,30	1,80	1,01
2	1,84	1,05	0,96
3	2,04	1,13	6,24
4	3,87	1,98	2,26
5	10,00	12,21	2,95
6	1,10	5,02	3,12
7	1,48	1,34	2,05
8	1,91	3,75	4,62
9	1,56	1,90	1,72
10	2,89	1,26	5,93
11	2,54	4,50	3,00
12	1,00	1,38	1,80
13	4,98	1,46	15,30
Moyenne	2,8	3,0	3,9
Ecart-type	2,4	3,1	3,8

Le Tableau 30 présente les résultats de stabilité posturale des différents participants pour chaque modalité vibratoire.

Tableau 30 : Résultats des écarts de stabilité avant et après simulation en mm²

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	36,83	10,77	4,99
2	48,65	29,56	30,97
3	1,99	0,78	16,99
4	59,48	17,88	17,88
5	28,43	11,08	19,54
6	28,14	10,90	94,25
7	21,03	15,61	33,77
8	22,63	28,76	17,02
9	1,54	30,44	66,53
10	16,02	28,00	36,27
11	12,66	54,98	8,36
12	246,92	90,92	142,98
13	59,02	77,93	4,17
Moyenne	44,87	31,35	37,98
Ecart-type	63,58	27,26	40,63

Enfin les Tableau 31 et Tableau 32 montrent les résultats des performances de navigation des participants pour chaque modalité.

Tableau 31 : Résultats des temps de réalisation du slalom en secondes

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	31,12	22,56	21,28
2	31,90	37,61	31,02
3	45,31	45,02	25,73
4	47,95	47,34	35,68
5	34,50	21,99	23,12
6	61,96	46,51	39,87
7	21,62	28,80	24,03
8	26,35	25,05	27,88
9	16,26	37,64	24,22
10	25,85	35,31	33,26
11	46,89	20,13	33,26
12	25,54	35,20	29,65
13	22,45	18,81	18,35
Moyenne	33,67	32,46	28,26
Ecart-type	13,17	10,25	6,21

Tableau 32 : Résultats des surfaces entre trajectoire de référence et trajectoire réalisée en m²

Participants	**Sans vibrations**	**Vibrations Synchronisées sur le pas**	**Vibrations proprioceptives**
1	17,89	16,38	15,08
2	19,53	18,36	18,86
3	19,84	20,57	13,58
4	39,23	24,51	27,12
5	25,48	12,28	14,69
6	34,26	12,79	11,32
7	13,69	19,93	14,12
8	20,63	17,12	21,01
9	8,48	11,88	10,85
10	16,30	24,36	18,91
11	44,49	9,99	18,91
12	23,51	34,54	54,72
13	10,04	8,86	8,95
Moyenne	22,57	17,81	19,09
Ecart-type	10,88	7,16	11,76

Afin d'analyser ces résultats, il est nécessaire de comparer les moyennes des différents résultats et de réaliser des tests statistiques pour vérifier si les différences notées sont significatives ou non. Lorsque les données respectent les conditions de distribution normale et d'équivalence des variances, nous utiliserons le test de Student pour des échantillons appariés.

Les résultats du questionnaire de présence donnent les moyennes présentées dans la Figure 47. On constate une augmentation pour la modalité de vibrations synchronisées sur le pas.

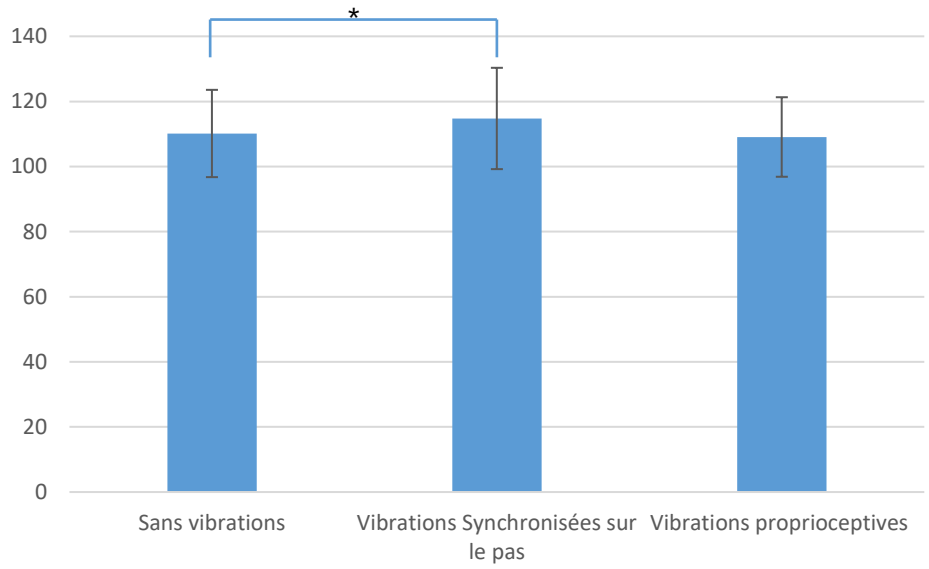


Figure 47 : Moyenne de la présence totale

Le test t de Student apparié, appliqué entre la simulation sans vibrations et celle avec les vibrations synchronisées sur le pas, retourne une p-value p=0.045 ; la présence totale est donc significativement supérieure avec la modalité de vibrations synchronisées sur le pas. En revanche, la différence entre les modalités sans vibrations et vibrations proprioceptive n'est pas significative. Le test d'équivalence donne même un p-value p=0.044 On peut donc conclure que la présence totale est équivalente pour les deux modalités.

Les résultats des scores des différentes sous-échelles de la présence sont exposés sur la Figure 48 pour les modalités sans vibrations et les vibrations synchronisées sur le pas. Les tests statistiques appliqués sur ces données ne retournent aucune différence significative. La différence constatée sur le score total de présence provient donc d'un ressenti général sur toutes les sous-échelles.

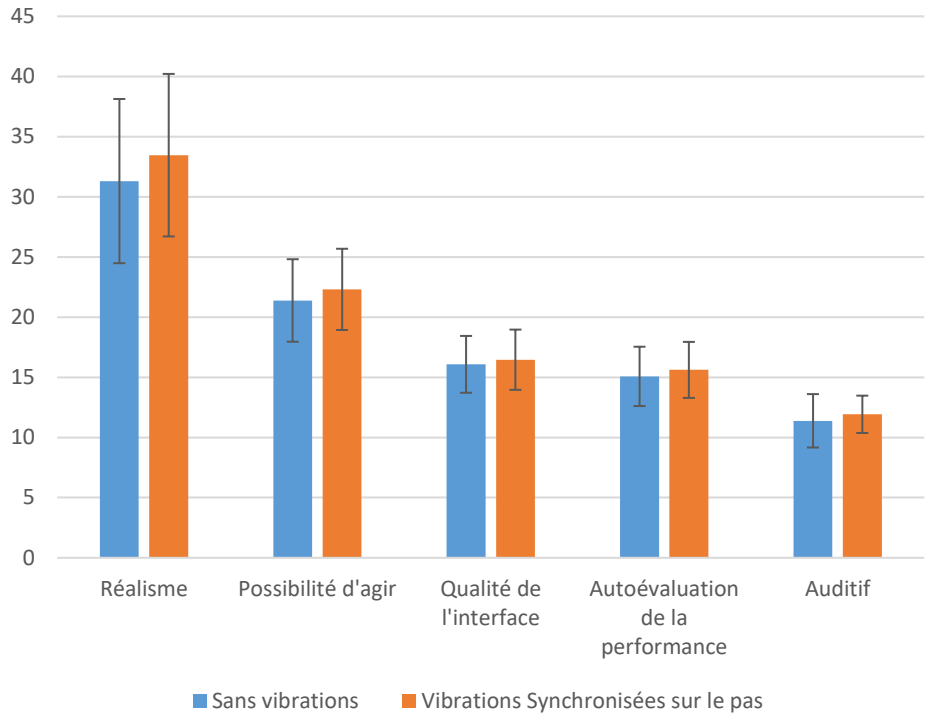


Figure 48 : Score des sous-échelles de présence

Concernant le mal du simulateur, la Figure 49 montre les moyennes des résultats du questionnaire sur le mal du simulateur.

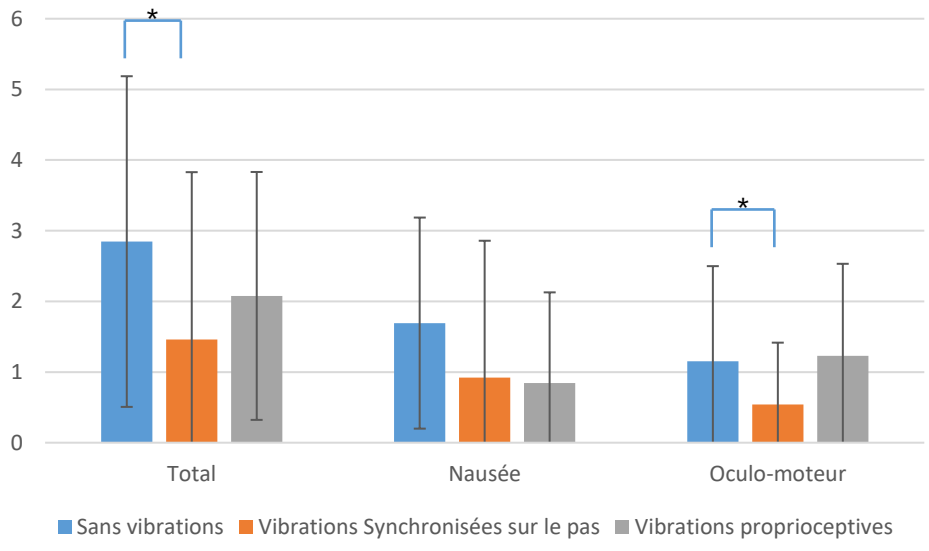


Figure 49 : Moyenne des scores du questionnaire sur le mal du simulateur

En réalisant le test t de Student apparié, on obtient une différence significative sur le mal du simulateur total pour les vibrations synchronisées sur le pas avec une p-value p=0.027, mais la différence n'est pas significative avec les vibrations proprioceptives avec une p-value p=0.155.

Le test t de Student apparié appliqué sur les sous-échelles retourne des p-value p=0.027 et p=0.075 respectivement pour les sous-échelles nausée et oculo-moteur pour la modalité des vibrations synchronisées sur le pas. On a donc une différence significative pour ce qui concerne la sous-échelle de la nausée, et une différence qui a tendance à être significative pour la sous-échelle oculo-moteur. Cette différence pourrait être significative avec un échantillon plus grand.

Contrairement aux mesures subjectives, les mesures objectives présentées dans la Figure 50 ne montrent pas de différence apparente entre les diverses modalités. Le test d'équivalence indique que les différents résultats sont équivalents avec des p-values p=0.001 et p=0.007 respectivement pour les modalités vibrations synchronisées sur le pas et vibrations proprioceptives concernant les indices de mal du simulateur. Et des p-values p=0.046 et p=0.027 respectivement pour les modalités vibrations synchronisées sur le pas et vibrations proprioceptives concernant les écarts de surface de stabilité.

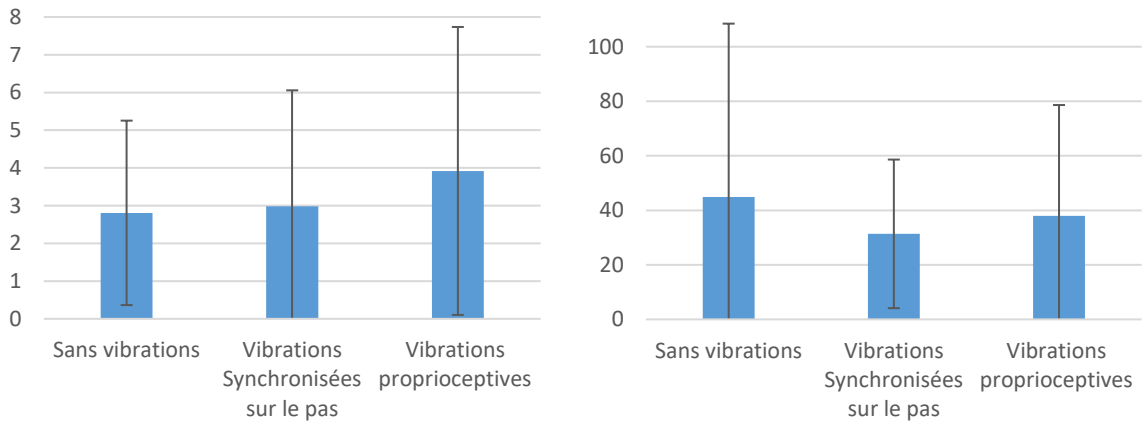


Figure 50 : Gauche – Indice moyen de mal du simulateur obtenu avec les mesure de conductivité de la peau / Droite - Résultats des moyennes d'écart de surface de stabilité (mm²)

Enfin, la Figure 51 montre les résultats concernant les performances de navigation.

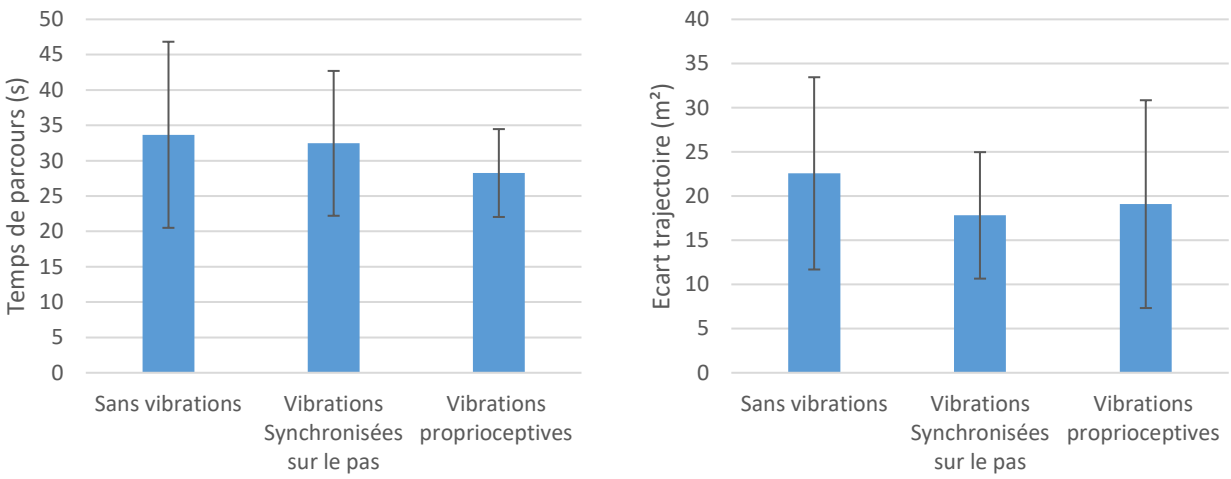


Figure 51 : Résultats moyens des indices de performances de navigation

Les mesures de performance ne montrent pas de différences significatives. Que ce soit pour le temps de parcours ou la précision de déplacement.

d. Conclusion

Les résultats permettent de constater que les modalités vibratoires expérimentées n'affectent pas la simulation de la même manière.

Les vibrations synchronisées sur le pas permettent d'augmenter le sentiment de présence totale de l'utilisateur lors de la simulation. En revanche, cette amélioration n'est pas ressentie de façon significative sur des sous-échelles spécifiées. La différence est globale, chaque sous-échelle est légèrement améliorée. Concernant le mal du simulateur, les résultats montrent certains aspects intéressants. En effet, le questionnaire montre une diminution significative du mal du simulateur perçu. Les deux sous-échelles nausée et oculo-moteur montrent des diminutions significatives. En revanche, les mesures objectives de la stabilité et de la conductance de la peau ne montrent pas d'effet de ces vibrations sur le mal du simulateur. Les vibrations synchronisées sur le pas permettent donc de diminuer le mal du simulateur ressenti, mais celui-ci reste présent. Concernant les performances de navigation, les vibrations synchronisées sur le pas n'ont pas d'impact ni sur le temps de parcours ni sur la précision de déplacement. Enfin, les résultats du questionnaire portant sur le ressenti des vibrations montrent que les vibrations synchronisées sur le pas ne gênent que légèrement l'utilisateur et donnent une bonne indication sur le déplacement réalisé.

D'un autre côté, les vibrations proprioceptives n'ont pas d'effet sur le sentiment de présence. De même, les mesures subjectives et objectives du mal du simulateur permettent de constater que ces vibrations proprioceptives n'ont pas d'effet sur celui-ci. Les performances de navigation ne sont pas affectées par les vibrations proprioceptives non plus. En revanche,

le questionnaire de ressenti des vibrations montre que les vibrations proprioceptives ne gênent pas du tout l'utilisateur et permettent un bon ressenti du déplacement dans l'environnement virtuel.

1.3. Conclusion relative aux vibrations concernant la partie action de la navigation

Les deux expérimentations précédentes montrent les effets des différentes modalités vibratoires avec deux méthodes de navigation de natures différentes. Les deux méthodes sont abstraites mais la première est égo-centrée tandis que la seconde est exo-centrée.

Ces expérimentations montrent des résultats différents.

Dans le cas de la méthode de navigation abstraite égo-centrée, on observe que les vibrations proprioceptives permettent de diminuer le mal du simulateur sans affecter le sentiment de présence ni les performances de navigation. Tandis que les vibrations synchronisées sur le pas permettent d'améliorer le sentiment de présence sans avoir d'effet sur le mal du simulateur.

Pour la méthode de navigation abstraite exo-centrée, les vibrations proprioceptives n'ont pas d'effet sur la simulation que ce soit pour le mal du simulateur, le sentiment de présence ou la performance de navigation. Cependant, on observe que les vibrations synchronisées sur le pas permettent d'améliorer le sentiment de présence sans avoir d'effet sur le mal du simulateur.

On constate que les vibrations synchronisées sur le pas ont le même effet pour les deux méthodes de navigation expérimentées. Cela signifie que ces vibrations peuvent être utilisées avec ces deux catégories de méthode de navigation, si on veut améliorer le sentiment de présence.

Enfin, la différence observée sur les vibrations proprioceptives provient sûrement de la nature des vibrations. La proprioception est un phénomène interne à l'individu. Le fait de ne pas agir directement sur soi pour se déplacer ne permet plus le fonctionnement de l'illusion proprioceptive. C'est pourquoi les vibrations proprioceptives n'ont pas d'effet avec les méthodes de navigation abstraite exo-centrée.

2. Vibrations relatives à la cognition de la navigation

Dans ce dernier chapitre, nous traiterons la partie cognition de la navigation avec comme objectif d'utiliser des vibrations pour aider l'utilisateur à s'orienter et trouver son chemin dans l'environnement virtuel. En immersion, il est plus ou moins difficile pour l'utilisateur de réussir à s'orienter. En effet, du fait que l'environnement peut être complètement inconnu voir irréel,

cela entraîne des désorientations. L'idée dans ce chapitre est de concevoir un langage vibratoire permettant de guider au mieux une personne immergée dans un environnement virtuel. Pour cela, nous allons créer deux langages vibratoires reposant sur des principes différents et les comparer en termes de performance de navigation (en précision de navigation et temps de parcours pour réaliser la tâche de navigation). Les deux langages sont appelés « Pushing pattern » et « Compass pattern ». Dans un premier temps, nous expliquerons comment fonctionnent ces deux langages. Nous allons ensuite les mettre en œuvre dans une expérimentation qui permettra de déterminer leurs performances respectives pour guider une personne en immersion. Cela mènera donc à la conception d'un scénario accompagné d'un protocole expérimental suivi de résultats et de leurs analyses. Nous pourrons enfin conclure sur les capacités de guidage de chacun des langages vibratoires.

2.1. Langages vibratoire

Dans cette partie, nous expliquerons comment fonctionnent les deux langages conçus « Pushing pattern » et « Compass pattern ». Mais dans un premier temps, nous présenterons le matériel utilisé pour transmettre les vibrations à l'utilisateur.

2.1.1. Matériel

Pour appliquer les vibrations des deux langages vibratoires, nous utilisons les bracelets VibroTac de Sensodrive (Figure 52).



Figure 52 : les deux bracelets VibroTac

Les bracelets sont composés de six moteurs indépendants. On numérote les différents moteurs de 1 à 6 pour les repérer spatialement. Le moteur numéro 1 se trouve sous le boîtier

de commande. Il est possible de commander chaque moteur en lui spécifiant une amplitude et un temps d'activation. Ainsi, chaque moteur peut transmettre des vibrations différentes pour ce qui est de la durée et de l'intensité.

Pour ce chapitre, nous utilisons deux bracelets qui, au lieu d'être utilisés sur les poignets sont installés sur les chevilles. Les deux bracelets vibreront de la même manière pour stimuler les chevilles afin que l'utilisateur puisse percevoir le langage de guidage sur les deux chevilles. Cette configuration permet de prendre en considération trois principes : (a) la navigation dans le monde réel implique beaucoup plus les jambes et les pieds que les bras et les mains ; (b) les bracelets ont besoin d'être dans un repère fixe par rapport au corps de l'utilisateur pour que celui-ci ressente le guidage sans que celui-ci ne soit influencé par un changement d'orientation des bracelets, ce qui pourrait induire des erreurs ; (c) l'utilisateur a besoin de ses mains pour naviguer dans l'environnement virtuel, ce qui implique qu'elles bougent lors de la simulation, les poignets ne forment donc pas un repère fixe.

2.1.2. « Pushing pattern »

Le langage « Pushing Pattern », illustré dans la Figure 53, est constitué de deux types de vibrations différents.

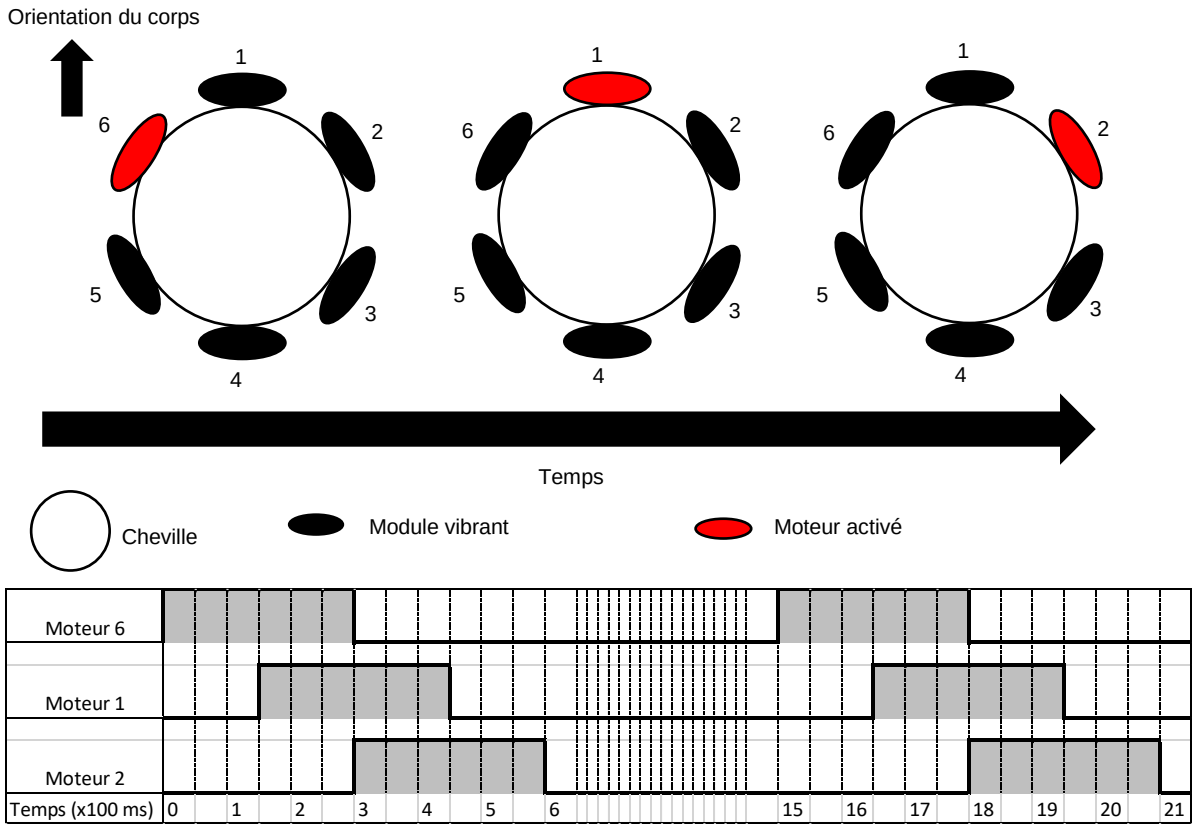


Figure 53 : Schéma indiquant une rotation avec le "Pushing pattern"

Le premier type de vibrations est une vibration sur l'arrière de la cheville qui est activée lorsque l'utilisateur est orienté dans la direction à suivre. Ces vibrations sont appliquées à l'aide du moteur numéro 4. L'intensité d'activation du moteur est de 80%. Cette vibration a pour objectif d'inviter l'utilisateur à avancer dans l'environnement virtuel. C'est comme si la vibration poussait en avant l'utilisateur sur l'arrière de sa cheville.

Le second type de vibrations correspond à une séquence d'activation pour donner un signal de rotation à droite ou à gauche à l'utilisateur. Cette séquence est composée de l'activation consécutive des trois moteurs 6, 1 et 2 positionnés sur l'avant des chevilles. Suivant la rotation qui est souhaitée, l'activation s'effectue dans le sens 6,1,2 pour une rotation à droite ou à l'inverse 2,1,6 pour une rotation à gauche. La Figure 53 montre la séquence pour une rotation à droite. Chaque moteur impliqué est activé à 100% de son intensité pour une durée de 300 ms. L'intervalle de temps entre l'activation de 2 moteurs consécutifs est de 150 ms. Ces vibrations donnent l'impression à l'utilisateur que ses chevilles sont attrapées par une main qui le pousse à réaliser une rotation dans le monde virtuel. La séquence de rotation est appliquée lorsque l'utilisateur doit réaliser une rotation dans l'environnement virtuel pour s'orienter correctement et retrouver le premier signal indiquant qu'il fait face à la bonne direction.

2.1.3. « Compass pattern »

Ce langage peut être comparé à une boussole où l'aiguille indique la direction. La direction est indiquée par la vibration et la cheville de l'utilisateur. La source de vibration se déplace alors autour des chevilles en fonction de la direction à suivre comme l'indique la Figure 54.

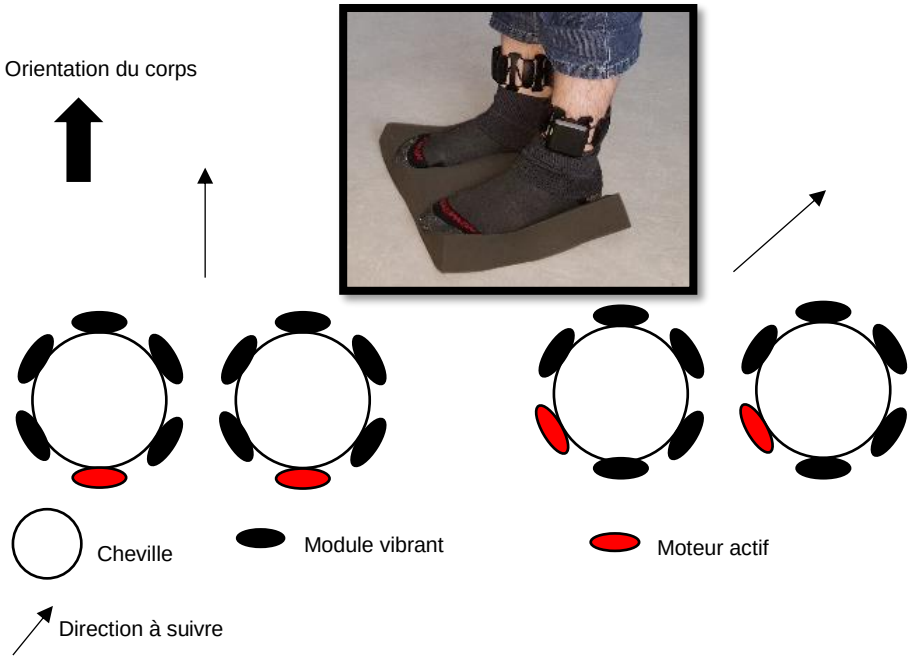


Figure 54 : Principe du "Compass pattern"

Pour simuler le déplacement de la vibration autour des chevilles, les moteurs sont activés 2 à 2 avec des amplitudes complémentaires. Il y a six moteurs sur les bracelets ; l'espace est donc séparé par angle de 60° et par tranche de 60°, les moteurs sont activés par 2 avec une amplitude modulée de façon linéaire en fonction de l'angle comme le montre la Figure 55 pour les moteurs 1 et 2 pour un angle allant de 0° à 60°. Le schéma est répété pour les différentes tranches de 60°.

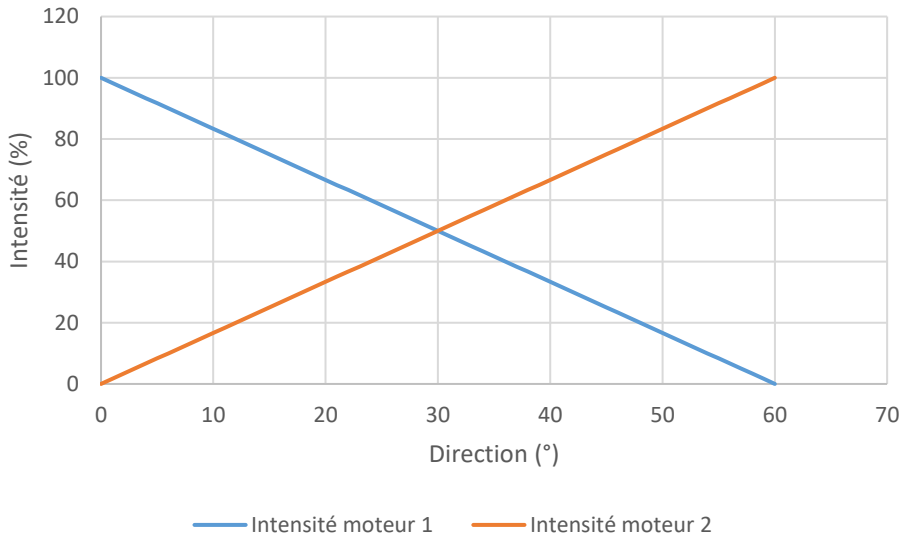


Figure 55 : Intensité d'activation des moteurs en fonction de l'angle

Les vibrations construisent alors une sorte de vecteur indiquant la direction à suivre en temps réel. Pour suivre la bonne direction, l'utilisateur doit maintenir les vibrations sur l'arrière de ses chevilles.

Les deux langages sont basés sur un principe où les vibrations sont assimilées à un effort qui pousse l'utilisateur dans la direction à suivre.

La grande différence entre les deux langages est que le « Compass pattern » est un signal analogique, il change en continu et s'adapte sans discontinuité tandis que le « Pushing pattern » est, lui, composé de deux signaux qui ont un comportement logique. De plus le « Compass pattern » ne possède pas d'information de rotation alors que le « Pushing pattern » est composé de deux signaux distincts.

Pour comparer ces deux langages pour ce qui de la performance de guidage, nous avons mis en place une expérimentation permettant de comparer ces deux modalités.

2.2. Expérimentation

2.2.1. Scénario

Pour comparer les performances de guidage des deux langages présentés précédemment, nous avons créé un environnement virtuel dans lequel l'utilisateur peut se promener dans une plaine herbeuse en utilisant les manettes Hydra de Razor. Pour matérialiser la position et les pas de l'utilisateur, une paire de chaussures est disposée sous la position de son avatar. L'utilisateur voit en permanence les chaussures ainsi que l'environnement l'entourant. De plus lors de la simulation, l'utilisateur entend ses propres pas virtuels dans la simulation.

Pour évaluer les performances de guidage des langages vibratoires, l'utilisateur avait comme tâche de suivre un chemin invisible dans la plaine. Seules les vibrations lui permettaient de s'orienter. Chaque participant a réalisé l'expérimentation avec chacun des langages. Le chemin invisible consistait en une sinusoïdale de période constante de 12 m mais d'amplitude variable. 6 amplitudes différentes sont utilisées : 0 m, 0,3 m, 0,6 m, 1,2 m, 2,4 m et 4,8 m. L'ordre d'enchaînement des amplitudes est rendu aléatoire pour éviter l'effet d'apprentissage entre les différents passages d'un même utilisateur. Le chemin est construit de la façon suivante :

- 2 périodes de sinusoïdale d'amplitude 0 soit une ligne droite de 24 m
- 5 tranches de 2 périodes de sinusoïdale avec les amplitudes supérieures à 0 réparties de façon aléatoire
- 2 périodes de sinusoïdale d'amplitude 0 soit une ligne droite de 24 m

La Figure 56 montre un exemple de parcours.

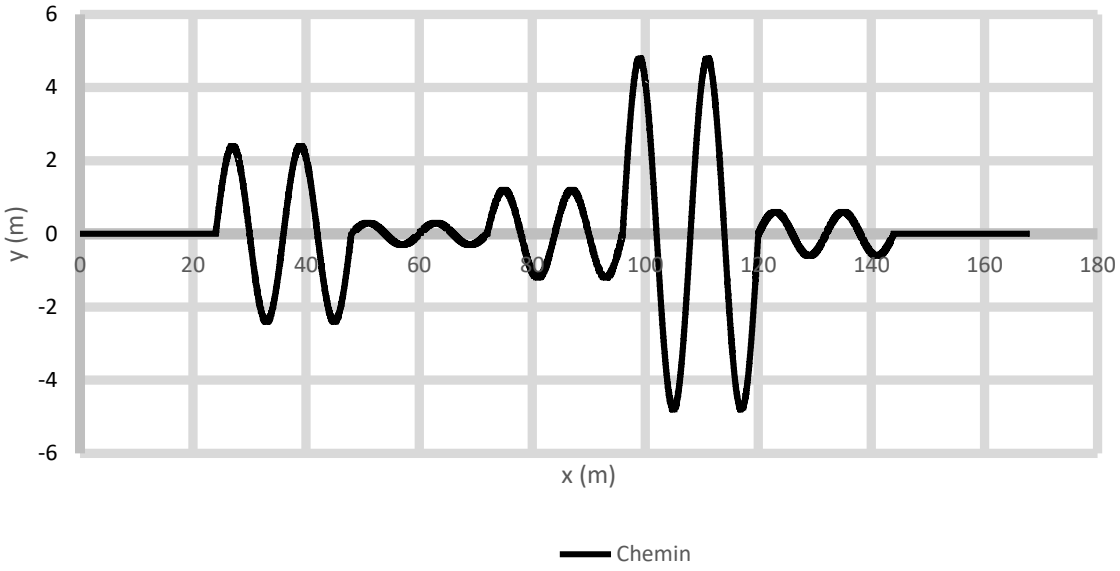


Figure 56 : Exemple de parcours invisible à suivre

2.2.2. Installation et protocole expérimental

L'expérimentation s'est déroulée au Canada au sein de l'université de Calgary sous l'approbation du Canadian Tri-Council Ethics Guidelines.

On demande au participant de naviguer dans un environnement virtuel. Le participant se tient debout devant un écran 24" permettant de visualiser l'environnement virtuel. L'utilisation de l'écran permet de réduire le mal du simulateur. L'écran se trouve à une distance d'un bras de l'utilisateur et est incliné en fonction de la taille du participant comme montré sur la Figure 57. Ainsi la tête du participant penche naturellement tout en gardant le regard perpendiculaire à l'écran.

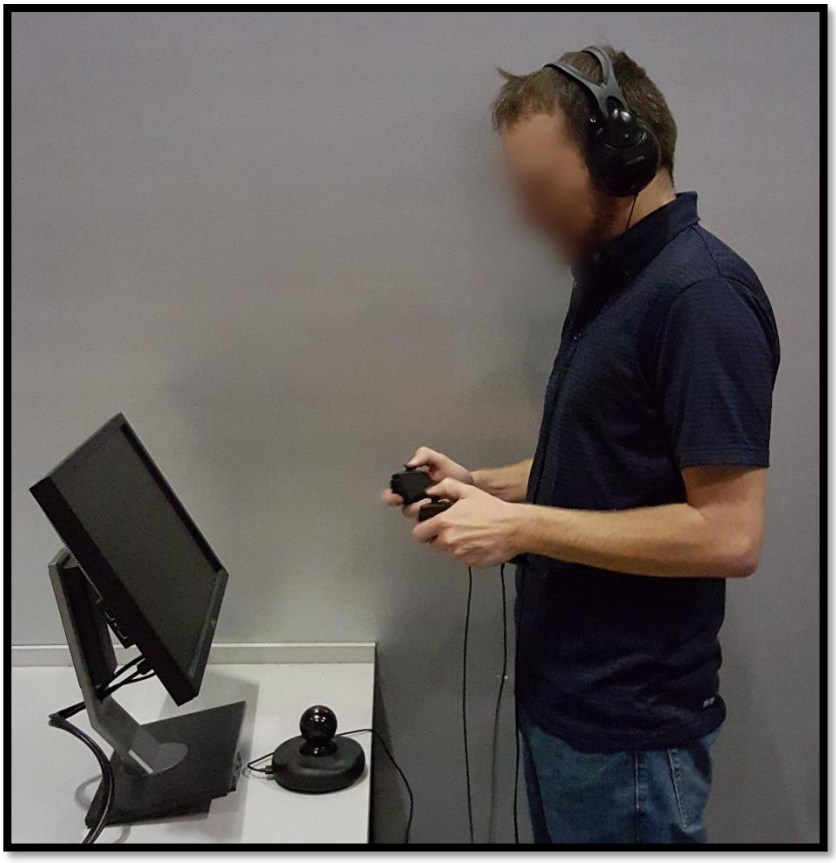


Figure 57 : Installation expérimentale

Pour naviguer dans l'environnement virtuel, le participant utilise la méthode de navigation Contrôle FP en vitesse sur laquelle ont été retirées les translations latérales. Ainsi, avec le joystick droit l'utilisateur peut avancer et reculer tandis qu'avec le joystick gauche, il peut tourner à droite et à gauche.

Les bracelets sont positionnés comme dans le cas des vibrations synchronisées sur le pas, au niveau des chevilles avec le boîtier de commande positionné sur l'extérieur pour assurer un positionnement identique pour tous les participants.

L'expérimentation se passe en six parties. Dans la première partie, les participants répondent à des questionnaires permettant de vérifier leur vision, leur main et pied principaux ainsi que leur niveau de malaise concernant le mal du simulateur. Dans cette partie, leur sensibilité aux vibrations est aussi testée. Si les participants ne sentent pas de différence entre les divers signaux vibratoires, ils ne peuvent participer à l'expérimentation. Ensuite s'enchaînent 3 parties où le participant s'entraîne et 2 parties où le participant est évalué. Le premier entraînement permet au participant d'appréhender la méthode de navigation. Il lui est demandé de suivre une trajectoire représentée par des cônes disposés au sol. Une fois que le participant est à l'aise avec la méthode de navigation, la seconde phase d'entraînement commence. Dans cette phase, le participant apprend un des langages vibratoires et réalise

la même trajectoire que précédemment mais cette fois-ci en suivant les vibrations pour s'orienter. Une fois le premier langage acquis, la première session d'évaluation commence. Le participant réalise alors la trajectoire invisible en suivant les indications des vibrations. Pendant cette session, la position du participant dans l'environnement virtuel et son temps de parcours sont enregistrés. Par la suite, on réalise la dernière séance d'entraînement pour apprendre le second langage, pour finir par la dernière partie d'évaluation permettant d'évaluer les performances du second langage. L'ordre d'apprentissage et d'évaluation des langages est aléatoire pour éviter un biais provenant du phénomène d'apprentissage. Entre chaque partie le participant remplit un questionnaire sur le mal du simulateur. Si le niveau de malaise augmente, le participant arrête l'expérimentation, car le mal du simulateur peut influencer les performances de navigation et donc biaiser les résultats. Enfin, à la fin de chaque partie d'évaluation le participant remplit un questionnaire composé des questions suivantes : (1) Comment les bracelets ont-ils guidé votre promenade ? (2) Comment était votre réaction par rapport au mécanisme de guidage apporté par les bracelets ? (3) A quel point avez-vous aimé le guidage apporté par les bracelets ? Les réponses sont exprimées sur une échelle de Likert à 5 niveaux.

2.2.3. Résultats et analyses

Onze participants ont réalisé l'expérimentation. Trois d'entre eux sont devenus malades et n'ont pas pu finir l'expérimentation. Les résultats sont donc fournis pour les 8 participants retenus. Les participants sont âgés de 25 à 44 ans avec une moyenne d'âge de 30 ans. 3 d'entre eux étaient des hommes et les 5 autres des femmes. Ils avaient tous une vision normale ou corrigée à la normale, étaient tous droitiers pour les mains, et, tous sauf un, avaient le pied droit comme pied principal. 4 des participants ont commencé par le « Compass pattern » et l'autre moitié a commencé par le « Pushing pattern ».

Grâce aux mesures réalisées pendant les phases d'évaluation, on peut calculer la surface d'écart entre la trajectoire théorique et la trajectoire réalisée. La Figure 58 montre que la moitié des participants a mieux suivi la trajectoire avec le « Pushing pattern » tandis que l'autre moitié a été meilleure avec le « Compass parttern ».

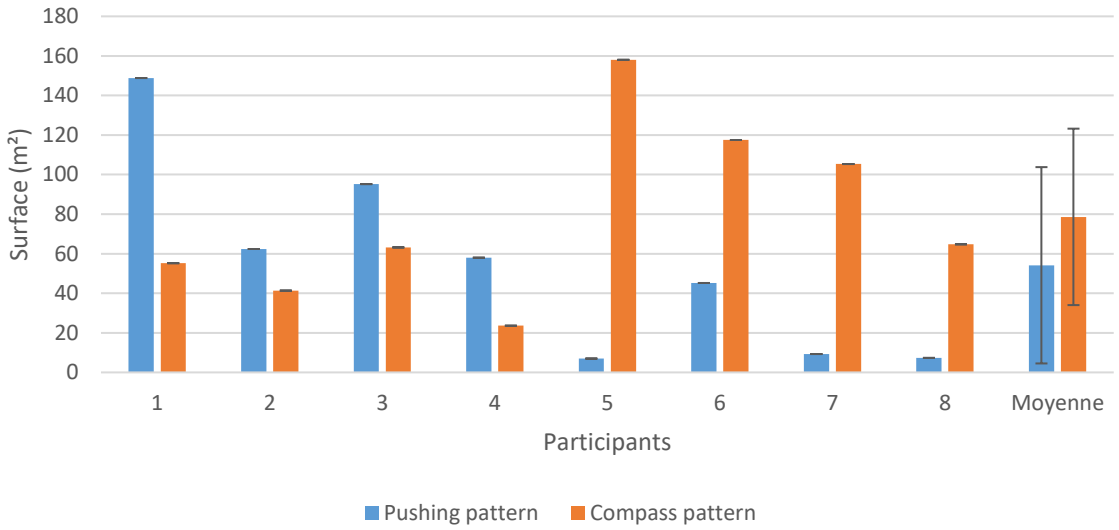


Figure 58 : Surface entre la trajectoire théorique et la trajectoire réalisée

La moyenne de surface d'écart est de 54 m² avec un écart-type de 49 pour le « Compass pattern » tandis que la moyenne est de 79 m² avec un écart-type de 45 pour le « pushing pattern ». Après avoir validé la répartition normale des résultats et l'équivalence de leur variance, le test de Student apparié donne la p-value p=0.427 ; la différence entre les deux moyennes est donc non significative.

En revanche, la Figure 59 montre que, pour le temps de réalisation du parcours, tous les participants ont été plus rapides avec le « Compass pattern ». Le temps moyen de réalisation du parcours avec le « Compass pattern » n'est que de 659 s avec un écart-type de 108, tandis qu'avec le « Pushing pattern », le temps moyen de réalisation du parcours est de 907 s avec un écart-type de 69.

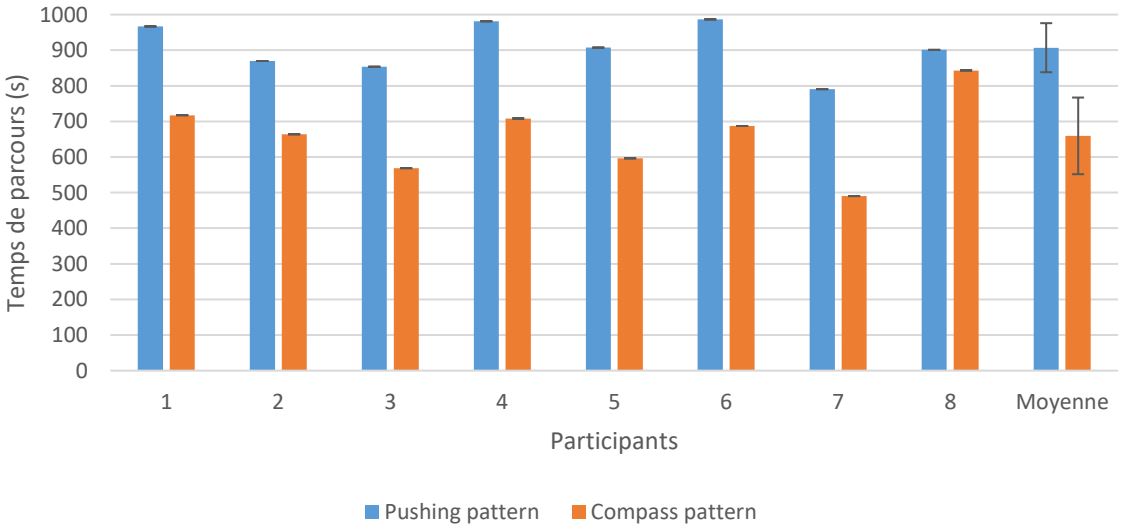


Figure 59 : Temps de réalisation du parcours

Le test de Student apparié donne la p-value p=0.0001, ce qui signifie que la différence entre les deux modalités est très significative en ce qui concerne le temps de réalisation du parcours. Le « Compass pattern » est 27% plus efficace pour ce qui est le temps de réalisation de parcours que le « Pushing pattern ».

Il est possible de calculer la précision de suivi de la trajectoire en définissant un chemin d'une largeur de 60 cm avec, comme trajectoire médiane, le parcours invisible (Figure 60). On admet alors que le participant est sur la trajectoire s'il se trouve sur ce chemin.

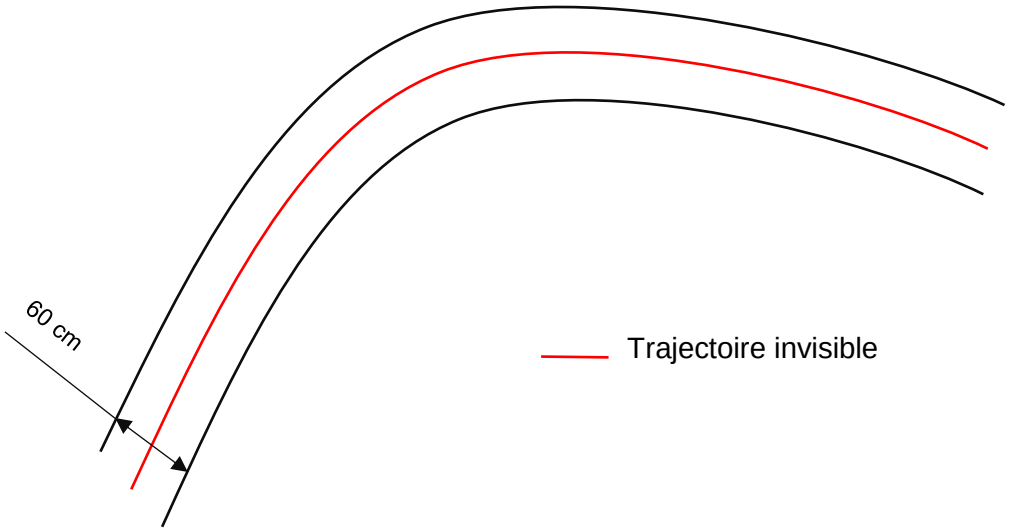


Figure 60 : Chemin pour calculer la précision de suivi

L'équation suivante permet alors de déterminer le pourcentage de précision de suivi de la trajectoire :

$$\%\ \text{de précision} = \frac{\text{Longueur de trajectoire sur le chemin}}{\text{Longueur totale du parcours}}$$

Enfin, on peut déterminer un indice de performance globale de navigation qui permet de prendre en compte le temps de réalisation du parcours et la précision de suivi. L'équation suivante définit cet indice P :

$$P = \frac{\%\ de\ pécision}{Temps\ de\ réalisation\ du\ parcours}$$

La Figure 61 montre les scores des indices de performance globale de navigation. Pour le « Pushing pattern » la moyenne des indices de performance est de 5,8 avec un écart-type de 1,1 de l'autre côté, la moyenne des indices de performance est de 7,3 avec un écart-type de 1,3 pour le « Compass pattern ».

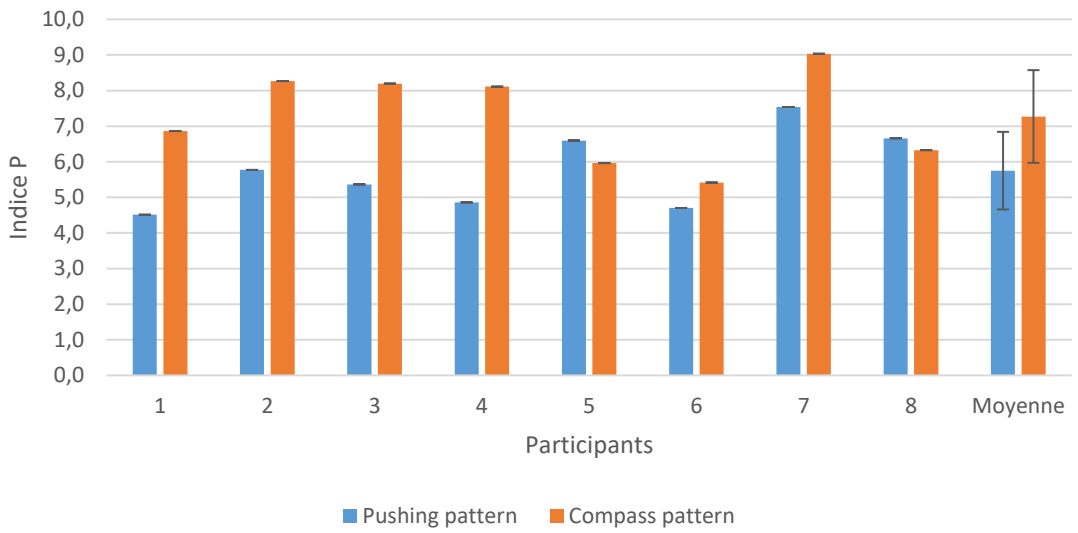


Figure 61 : Indice de performance de navigation

Le test de Student apparié donne une p-value de p=0.022, ce qui montre que la différence entre les indices est significative. Le « Compass pattern » permet de meilleures performances globales.

En examinant les réponses des questionnaires, on observe que 6 des 8 participants ont préféré le « Compass pattern » et 5 sur les 8 ont rapporté être plus réactifs au « Compass pattern ».

2.3. Conclusion

Les résultats précédents montrent que le langage « Compass pattern » est plus efficace pour guider les personnes dans un environnement virtuel. Ils montrent aussi que ce langage vibratoire est préféré. Ces résultats sont confirmés à la fois par les mesures objectives et par les mesures subjectives. Ce résultat provient sans doute du fait que le langage « Compass pattern » doit être plus intuitif car il ne possède qu'une sorte de vibration et, comme expliqué avant, il est par nature analogique, ce qui permet sûrement de réduire la charge cognitive nécessaire pour comprendre le langage et donc être plus performant sur la tâche de navigation elle-même.

Cette expérimentation a donc permis de déterminer que le langage basé sur le « Compass pattern » est de loin le meilleur des deux langages développés ici pour aider l'utilisateur d'un système de réalité virtuelle à s'orienter pour naviguer dans l'environnement virtuel.

Chapitre 4 - Conclusion

1. Conclusion

1.1. Synthèse

Les travaux de recherche présentés dans ce document ont pour objectif de déterminer les apports des modalités vibratoires pour l'aide à la navigation en environnement virtuel. Pour cela, nous avons d'abord exploré les composantes de la réalité virtuelle pour en comprendre ses fonctionnements et les apports possibles des vibrations appliquées sur l'utilisateur lors de son immersion. Cela nous a permis de déterminer les fonctionnements des principes de présence, du mal du simulateur, et surtout les mécanismes de navigation en environnement virtuel.

Nous avons ensuite exprimé une taxonomie des méthodes de navigation permettant de répertorier toutes les méthodes de navigation en quatre classes : Concrète Égo-centrée, Concrète Exo-centrée, Abstraite Égo-centrée et Abstraite Exo-centrée. Cette taxonomie nous a servi de base pour développer deux méthodes de navigation de natures différentes : le Contrôle FP en Vitesse et la Butterfly Navigation, toutes deux abstraites mais la première méthode est Égo-centrée tandis que la seconde est Exo-centrée.

Concernant les vibrations, nous nous sommes dans un premier temps penchés sur des vibrations rajoutées à une simulation de conduite. Ces vibrations permettant de simuler des bandes rugueuses, nous avons déterminé quels étaient leurs effets sur le comportement du conducteur. Nous avons déterminé que ces vibrations permettaient de rendre le conducteur plus attentif à l'environnement et rendaient par la même occasion sa conduite plus sûre.

Par la suite, nous nous sommes tournés vers les simulations où l'activité de navigation concernait la marche humaine. Nous avons alors mis en place différentes modalités vibratoires. Les vibrations proprioceptives appliquées sur le bas des fessiers permettent de donner l'illusion à l'utilisateur d'un léger déséquilibre vers l'avant lorsque celui-ci se déplace dans l'environnement virtuel. Les vibrations synchronisées sur le pas - réalisées à l'aide de deux bracelets VibroTac positionnés sur les chevilles - permettent de donner une métaphore de la pose des pieds virtuels lors de la marche. Et enfin les vibrations continues appliquées également à l'aide des bracelets VibroTac positionnés sur les chevilles permettent de rendre un aspect haptique au principe de vection.

Nous avons expérimenté ces modalités sur les deux méthodes de navigation développées, ce qui a permis de déterminer les apports suivants pour une méthode de navigation Abstraite Égo-centrée :

- Les vibrations proprioceptives permettent de diminuer le mal du simulateur de façon importante sans affecter le sentiment de présence ni les performances de navigation.
- Les vibrations synchronisées sur le pas permettent d'augmenter le sentiment de présence et de diminuer légèrement le mal du simulateur, tout en n'affectant pas les performances de navigation de l'utilisateur.
- Les vibrations continues améliorent le sentiment de présence mais dans une moindre mesure comparées aux vibrations synchronisées sur le pas. Elles n'ont aucun effet sur le mal du simulateur ni les performances de navigation.

On obtient les résultats suivants pour les effets apportés par ces modalités vibratoires avec une méthode de navigation Abstraite Exo-centrée :

- Les vibrations proprioceptives n'ont pas d'effet sur le mal du simulateur, ni sur le sentiment de présence, ni sur les performances de navigation.
- Les vibrations synchronisées sur le pas permettent d'augmenter le sentiment de présence et de diminuer légèrement le mal du simulateur, tout en n'affectant pas les performances de navigation de l'utilisateur.

Cela permet de conclure qu'il est intéressant d'utiliser les vibrations proprioceptives dans le cas d'une méthode de navigation abstraite égo-centrée mais qu'il est inutile de les intégrer dans une simulation où la navigation est réalisée avec une méthode abstraite exo-centrée. En revanche, les vibrations synchronisées sur le pas peuvent être utilisées avec les deux catégories de méthodes de navigation. Leurs effets seront identiques, elles amélioreront le sentiment de présence.

Enfin, nous avons exploré les apports de modalités vibratoires pour l'aide à la navigation pour la partie cognitive de la navigation. Pour cela nous avons comparé deux langages vibratoires permettant de guider les utilisateurs dans un environnement virtuel. L'expérimentation réalisée nous a permis de déterminer qu'un langage vibratoire analogique donnant des informations en temps réel et possédant un seul type d'indication était plus performant pour guider une personne dans un environnement virtuel.

1.2. Perspectives

Ce travail de recherche montre que les vibrations peuvent apporter beaucoup à la réalité virtuelle. Bien choisie, une modalité vibratoire permet d'améliorer l'expérience de réalité

virtuelle de l'utilisateur pour ce qui est de la présence et du mal du simulateur. Ici, nous avons exploré ces modalités uniquement pour l'aide à la navigation. Les autres aspects de la réalité virtuelle profiteraient certainement aussi de réels apports avec l'ajout de modalités vibratoires. Il pourrait être intéressant d'essayer de développer encore l'aspect des vibrations proprioceptives pour les appliquer à différentes interactions autres que la navigation.

De même, les bracelets VibroTac ouvrent des perspectives d'utilisation nombreuses. Allant du pseudo-hatique avec des métaphores de contact avec les objets, à un guidage dans les mouvements réalisables dans la simulation.

Enfin, un parallèle avec la simulation de conduite pourrait déboucher sur la conception d'une plateforme dynamique destinée à la simulation de marche. Cette plateforme permettrait de simuler l'inclinaison du sol mais aussi de donner des impressions d'accélération et de granularité des revêtements du sol virtuel à l'aide de vibrations.

Références

[1] M. L. Heilig, «Sensorama Simulator». Virginia, USA Brevet US-3,050,870, 1962.

[2] I. E. Sutherland, «The ultimate display» chez *Proceedings of the IFIP Congress*, 1965.

[3] K. Kelly, A. Heilbrun et B. Stacks, «Virtual reality : an interview with Jaron Lanier» *Whole Earth Review,* n°164, pp. 108-120, 1989.

[4] G. Burdea et P. Coiffet, La réalité virtuelle, Hermès, 1993.

[5] P. Fuchs, G. Moreau, A. Berthoz et J.-L. Vercher, Le traité de la réalité virtuelle, Volume 1 : L'homme et l'environnement virtuel, M. P. L. presses, Éd., 2006.

[6] S. R. Elis, «Nature and origins of virtual environments : a bibliographical essay» *Computing Systems in Engineering,* vol. 2, n°14, pp. 321-347, 1991.

[7] D. Zeltzer, «Autonomy, interaction, and presence» *Presence : Teleoperators and Virtual Environments,* vol. 1, n°11, pp. 127-132, 1992.

[8] M. Slater, «A note on presence terminology» vol. 3, n°13, 2003.

[9] P. Fuchs, G. Moreau, B. Arnaldi et P. Guitton, Le traité de la réalité virtuelle, Volume 4 : Les applications de la réalité virtuelle, Mines Paris Les presses, 2006.

[10] M. Chevaldonnée, A. Saimpont, F. Merienne et T. Pozzo, «Postural empathy tests for the measure of immersion and presence in virtual environment» chez *Virtual Concept*, Cancun, Mexique, 2006.

[11] E. V. Ortega-Gozalez, «Etude de son 3D pour une interaction audio-visuelle», Arts et Métiers ParisTech, 2011.

[12] H. G. Hoffman, D. R. Patterson, J. Magula, G. J. Carrougher, K. Zelter, S. Dagadakis et S. R. Sharar, «Water-friendly virtual reality pain control during wound care» *J Clin Psychol,* vol. 60, n°12, pp. 189-195, 2004.

[13] J. Herder, R. Worzberger, U. Twelker et S. Albertz, «Use of virtual environments in the promotion and evaluation of architectural designs» *Journal of the 3D-Forum Society,* vol. 16, n°14, pp. 117-122, 2002.

[14] R. S. Kalawsky, «The validity of presence as a reliable human performance metric in immersive environments» chez *Proceedings of the 3rd Annual International Workshop on Presence*, 2000.

[15] M. Minsky, «Telepresence» *Omni,* pp. 45-51, 1980.

[16] T. B. Sheridan, «Musings on telepresence and virtual presence» *Presence : Teleoperators and Virtual Environment,* vol. 1, n°11, pp. 120-126, 1992.

[17] M. Slater et M. Usoh, «Presence in immersive virtual environments» chez *Proceedings of the IEEE Conference - Virtual Reality Annual International Symposium*, 1993.

[18] F. Biocca, «Can we resolve the book, the physical reality, and the dream state problems? From the two-pole to a three-pole model of shifts in presence» chez *EU Future and Emerging Technologies, Presence Initiative Meeting*, Venice, 2003.

[19] T. Schubert et J. Crusius, «Five theses on the book problem : Presence in books, film and vr» chez *Proceedings of the Fifth Annual International Workshop on Presence*, Porto Portugal, 2002.

[20] J. J. Gibson, The Ecological Approach to Visual Perception, 1 éd., L. E. Associates, Éd., 1986.

[21] P. Zahorik et R. L. Jenison, «Presence as being-in-the-world» *Presence : Teleoperators and Virtual Environments,* vol. 7, n°11, pp. 78-89, 1998.

[22] P. Bouvier, «LA PRÉSENCE EN RÉALITÉ VIRTUELLE, UNE APPROCHE CENTRÉE UTILISATEUR», Université Paris-Est, 2009.

[23] B. G. Witmer et M. J. Singer, «Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire» *Presence,* vol. 7, n°13, pp. 225-240, 1998.

[24] Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO, QUESTIONNAIRE SUR L'ÉTAT DE PRÉSENCE, 2002.

[25] Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO, QUESTIONNAIRE SUR LA PROPENSION À L'IMMERSION, 2002.

[26] C. Hendrix et W. Barfield, «The sense of presence within auditory virtual environments.» *Presence: Teleoperators and Virtual Environments,* vol. 5, n°13, pp. 290-301, 1996.

[27] S. R. Elis, «Presence of mind: A reaction to Thomas Sheridan's "Further musings on the psychophysics of presence» *Presence: Teleoperators and Virtual Environments,* vol. 5, n°12, pp. 247-259, 1996.

[28] M. Lombard et T. Ditton, «At the heart of It all: The concept of presence» *Journal of Computer Mediated Communication,* vol. 3, n°12, 1997.

[29] M. Meehan, «Measuring presence objectively» *British Psychological Society Work Shop on Presence and Its Measures,* 2000.

[30] M. Meehan, «An objective surrogate for presence: Physiological response» *3rd Int. Wkshp. on Presence.*

[31] T. B. Sheridan, «Further musings on the psychophysics of presence» *Presence: Teleoperators and Virtual Environments,* vol. 5, n°12, pp. 241-246, 1996.

[32] M. Slater, «Measuring Presence: A Response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire.» *Presence: Teleoperators and Virtual Environments,* vol. 8, n°15, pp. 560-565, 1999.

[33] D. M. Johnson, «Introduction to and Review of Simulator Sickness Research. Research Report» 2005.

[34] R. S. Kennedy et L. Frank, «A review of motion sickness with special reference to simulator sickness» Naval Training Equipment Center, Orlando, FL, 1985.

[35] E. Kolasinski, «Simulator sickness in virtual environments» U.S. Army Research institute for the Behavioral and Social Sciences, 1995.

[36] J. J. LaViola, «A Discussion of cybersickness in virtual environments» *ACM SIGCHI Bulletin,* vol. 32, n°11, pp. 47-56, 2000.

[37] J. Reason et J. Brand, «Motion sickness» *Academic press,* 1975.

[38] T. Stoffregen et G. E. Riccio, «An ecological critique of the sensory conflict theory of motion sickness» *Ecological Psychology,* vol. 3, n°13, pp. 159-194, 1991.

[39] T. Stoffregen, L. J. Hettinger, M. W. Haas, M. M. Roe et L. J. Smart, «Postural instability and motion sickness in a fixed-base flight simulator» *Human Factors,* vol. 42, n°13, pp. 458-469, 2000.

[40] M. Treisman, «Motion sickness : an evolutionary hypothesis» *Science,* vol. 197, pp. 493-495, 1977.

[41] J. F. Golding, «Motion sickness susceptibility» *Autonomic neuroscience : basic & clinical,* vol. 129, pp. 67-76, 2006.

[42] M. Pinto, «Les Interactions Multisensorielles dans la Perception du Mouvement longitudinal. Implications pour les Simulateurs de Conduite» Univeristé Grenoble 2, 2007.

[43] S. Nichols, C. Haldane et J. R. Wilson, «Measurement of presence and its consequences in virtual environments» *International Journal of Human-Computer Studies,* vol. 52, n°13, pp. 471-491, 2000.

[44] K. M. Stanney, K. S. Kingdon, D. Graeber et R. S. Kennedy, «Human performance in immersive virtual environments : effects of exposure duration, user control, and scene complexity» *Human Performance,* vol. 15, n°14, pp. 339-366, 2002.

[45] M. Pinto, V. Cavallo et T. Ohlmann, «Revues de questions. The development of driving simulators : toward a multisensory solution» *Le Travail Humain,* vol. 71, n°11, pp. 62-95, 2008.

[46] P. Gianaros, E. Muth, J. Morkoff, M. Levin et R. Stern, «A Questionnaire for the Assessment of the Multiple Dimensions of Motion Sickness» *Aviation Space Environmental Medicine,* vol. 72, pp. 115-119, 2001.

[47] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum et M. G. Lilienthal, «Simulator Sickness Questionnaire : An enhanced method for quantifying simulator sickness.» *The International Journal of Aviation Psychology,* vol. 3, n°13, pp. 203-220, 1993.

[48] R. S. Kennedy, J. M. Drexler et D. E. Compton, «Configural Scoring of Simulator Sickness, Cybersickness and Space Adaptation Syndrome : Similarities and Differences?» NASA Johnson Space Center, Orlando, Florida, 2001.

[49] H. A. Stoner, D. L. Fisher et M. J. Mollenhauer, «Simulator and Scenario Factors Influencing Simulator Sickness» *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology,* 2011.

[50] R. S. Kennedy et J. E. Fowlkes, «Simulator sickness is polygenic and polysymptomatic : Implications for research» *The International Journal of Aviation Psychology,* vol. 2, n°11, pp. 23-38, 1992.

[51] V. Dagonneau, «Etude des liens entre immersion et présence pour la mise au point d'un simulateur de conduite de deux-roues motorisé» Université Paris-Sud, 2012.

[52] R. S. Kennedy, N. E. Lane, M. C. Grizzard, K. M. Stanney, K. Kingdon et S. Lanham, «Use of a motion history questionnaire to predict simulator sickness» chez *DSC 2001 : driving simulation conference*, Sophia Antipolis, 2001.

[53] J. G. Casali et L. H. Frank, «Manifestation of visual/vestibular disruption in simulators: Severity and empirical measurement of symptomatology» chez *AGARD, Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness*, Neuilly-sur-Seine, France, 1988.

[54] T. A. Stoffregen et L. J. Smart, «Postural instability precedes motion sickness» *Brain Research Bulletin,* vol. 47, n°15, pp. 437-448, 1998.

[55] J. E. Bos, «Nuancing the relationship between motion sickness and postural stability» *Displays,* vol. 32, pp. 189-193, 2011.

[56] R. A. Bolt, «"Put-That-There" : Voice and gesture at the graphics interface» *ACM Siggraph Computer Graphics,* vol. 14, pp. 262-270, 1980.

[57] Z. Pan, A. D. Cheok, H. Yang, J. Zhu et J. Shi, «Virtual reality and mixed reality for virtual learning environments» *Computer & Graphics,* vol. 30, n°11, pp. 20-28, 2006.

[58] C. Ware et D. R. Jessome, «Using the bat: A six-dimensional mouse for object placement» *Computer Graphics and Applications, IEEE,* vol. 8, n°16, pp. 65-70, 1988.

[59] B. Watson, V. Spaulding, N. Walker et W. Ribarsky, «Evaluation of the effects of frame time variation on vr task performance» chez *Virtual Reality Annual International Symposium, IEEE*, 1997.

[60] B. Westerdahl, K. Suneson, C. Wernemyr, M. Roupé, M. Johansson et C. Martin, «Users' evaluation of a virtual reality architectural model compared with the experience of the completed building» *Automation in construction,* vol. 15, n°12, pp. 150-165, 2006.

[61] C. D. Wickens et P. Baker, «Cognitive issues in virtual reality» vol. 1, 1995.

[62] L. Terziman, M. Marchal, F. Multon, B. Arnaldi et A. Lécuyer, «Short Paper: Comparing Virtual Trajectories Made in Slalom Using Walking-In-Place and Joystick Techniques» chez *Joint Virtual Reality Conference of EGVE - EuroVR*, 2011.

[63] L. Terziman, M. Marchal, M. Emily, F. Multon, B. Arnaldi et A. Lécuyer, «Shake-Your-Head: Revisiting Walking-In-Place for Desktop Virtual Reality» chez *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 2010.

[64] M. Cazin, «Vibration Mécaniques» *Encyclopaedia Universalis,* 2005.

[65] J. P. Roll, «La Proprioception : un sens premier ?» *Résonances Européennes du Rachis,* vol. 14, n°142, pp. 1731-1736, 2006.

[66] J.-P. Roll, «Les muscles, organes de la perception» *Pour la Science,* pp. 92-99, 1998.

[67] J.-P. Roll, M. Bergenheim et E. Ribot-Ciscar, «Proprioceptive population coding of 2-D limb movements in human : Part II. Muscle spindle feedback during "drawing like movements"« *Experimental brain research,* vol. 134, pp. 311-321, 2000.

[68] A. Petroni, J. Carbajal et M. Sigman, «Proprioceptive Body Illusions Modulate the Visual Perception of Reaching Distance» *PLOS ONE,* vol. 10, n°16, Juin 2015.

[69] C. Hayot, «Analyse biomécanique 3D de la marche humaine : Comparaison des modèles mécaniques», université de Poitiers, 2010.

[70] M. Whittle, «Gait analysis : an introduction» *Butterworth-Heinemann Medical,* 2002.

[71] E. Viel, «La marche humaine, la course et le saut : biomécanique, explorations, normes et dysfonctionnements.» *Elsevier Masson,* 2000.

[72] J. B. F. van Erp et H. A. H. C. van Veen, «Vibrotactile in-vehicle navigation system» *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour,* vol. 7, n°14-5, pp. 247-256, 2004.

[73] S. Papetti, F. Fontana, M. Civolani, A. Berrezag et V. Hayward, «Audio-tactile Display of Ground Properties Using Interactive Shoes» *Haptic and Audio Interaction Design,* vol. 6306, pp. 117-128, 2010.

[74] L. Turchet, R. Nordahl, S. Serafin, A. Berrezag, S. Dimitrov et V. Hayward, «Audio-haptic physically-based simulation of walking on different grounds» *Multimedia Signal Processing (MMSP), 2010 IEEE International Workshop on,* 2010.

[75] Y. Visell, B. L. Giordano, G. Millet et J. R. Cooperstock, «Vibration Influences Haptic Perception of Surface Compliance During Walking» *PLoS ONE,* vol. 6, n°13, 2011.

[76] L. Terziman, M. Marchal, F. Multon, B. Arnaldi et A. Lécuyer, «The King-Kong Effects: Improving Sensation of Walking in VR with Visual and Tactile Vibrations at each Step» chez *IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, 2012.

[77] L. Terziman, M. Marchal, F. Multon, B. Arnaldi et A. Lécuyer, «Personified and Multistate Camera Motions for First-Person Navigation in Desktop Virtual Reality» *IEEE Transactions on visualization and computer graphics,* vol. 19, n°14, pp. 652-661, 2013.

[78] I. Farkhatdinov, N. Ouarti et V. Hayward, «Vibrotactile Inputs To The Feet Can Modulate Vection» chez *World Haptics Conference*, Daejeon, 2013.

[79] S. Lind, L. Thomsen, M. Egeberg, N. Nilsson, R. Nordahl et S. Serafin, «Effects of vibrotactile stimulation during virtual sandboarding» chez *Virtual Reality (VR), 2016 IEEE*, Greenville (NC), 2016.

[80] B. J. McGrath, «Tactile instrument for aviation» NAVAL AEROSPACE MEDICAL RESEARCH LAB PENSACOLA FL, 2000.

[81] H. Uchiyama, M. A. Covington et W. D. Potter, «Vibrotactile Glove Guidance for Semi-Autonomous Wheelchair Operations» chez *Proceedings of the 46th Annual Southeast Regional Conference, ACM-SE 46*, New York, 2008.

[82] S. Burigat et L. Chittaro, «Navigation in 3D virtual environments: Effects of user experience and location-pointing navigation aids» *International Journal of Human-Computer Studies,* vol. 65, n°111, pp. 945-958, 2007.

[83] B. Witmer, J. Bailey, B. Knerr et K. Parsons, «Virtual spaces and real world places: transfer of route knowledge» *Int J Hum Comput Stud,* n°145, pp. 413-428, 1996.

[84] D. Bowman, E. Kruijff, J. J. LaViola et I. Poupyrev, «An introduction to 3D user interfaces design.» *Presence Teleoperators VR,* vol. 10, n°11, pp. 96-108, 2001.

[85] D. Bowman, E. Davis, L. Hodges et A. Badre, «Maintaining spatial orientation during travel in an immersive virtual environment» *Presence Teleoperators VR,* vol. 8, n°110, pp. 618-631.

[86] D. Bowman, A. A. Datey, Y. S. Ryu, U. Farooq et O. Vasnaik, «Empirical comparison of human behavior and performance with different display devices for virtual environments.» chez *Proceedings of human factors and ergonomics society annual meeting*, Baltimore, 2002.

[87] R. G. Golledge, «Cognition of physical and built environments» chez *Environment, cognition, and action: An integrated approach*, New York, 1991.

[88] T. Gärling, A. Book et E. Lindberg, «Spatial orientation and wayfinding in the designed environment.» *Journal of Applied Psychology,* vol. 68, n°11, pp. 177-186, 1983.

[89] J. P. Bliss, P. D. Tidwell et M. A. Guest, «The effectiveness of virtual reality for administering spatial navigation training to firefighters.» *Presence,* n°16, pp. 73-86, 1997.

[90] M. Tlauka et P. N. Wilson, «The effect of landmarks on route-learning in a computer-simulated environment» *Journal of Experimental Psychology,* n°114, pp. 305-313, 1994.

[91] P. Scilom, F. Giromini et J.-L. Albaret, Manuel d'enseignement de psychomotricité, S. Eds, Éd., 2011, pp. 222-223.

[92] D. Engel, C. Curio, L. Tcheang, B. Mohler et H. H. Bülthoff, «psychophysically calibrated controller for navigating through large environments in a limited free-walking space» chez *2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology (VRST '08)*, New York, NY, USA, 2008.

[93] S. Razzaque, D. Swapp, M. Slater, M. C. Whitton et A. Steed, «Redirected walking in place» chez *workshop on Virtual environments 2002 (EGVE '02)*, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2002.

[94] M. Slater, M. Usoh et A. Steed, «Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality» *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.,* vol. 2, n°13, pp. 201-219, 1995.

[95] M. Marchal, J. Pettré et A. Lécuyer, «Joyman: a Human-Scale Joystick for Navigating in Virtual Worlds» chez *IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2011 (3DUI)*, Singapour, Singapore, 2011.

[96] D. Mapes et J. Moshell, «A two-handed interface for object manipulation in virtual environments» *Presence: Teleoperation Virtual Environment,* vol. 4, pp. 403-416, 1995.

[97] I. P. M. Billinghurst et S. W. T. Ichikawa, «The Go-Go Interaction Technique: Non-linear Mapping for Direct Manipulation in VR» 1995.

[98] M. Mine, «Virtual environment interaction techniques» 1995.

[99] G. Cirio, P. Vangorp, E. Chapoulie, M. Marchal, A. Lécuyer et G. Drettakis, «Walking in a Cube: Novel Metaphors for Safely Navigating Large Virtual Environments in Restricted Real Workspaces» *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proceedings of IEEE Virtual Reality),* vol. 18, n°14, pp. 546-554, 2012.

[100] J. Plouzeau, D. Paillot, B. Aykent et F. Merienne, «Vibrations in dynamic driving simulator: Study and implementation» chez *CONFERE 2013*, 2013.

[101] R. Srinivasan, J. Baek et F. M. Council, «Safety Evaluation of Transverse Rumble Strips on Approaches to Stop-Controlled Intersections in Rural Areas» *Journal of Transportation Safety & Security,* pp. 261-278, 2010.

[102] B. Kjensli, «Fatal and serious traffic accidents involving only one car are down 30 percent on Swedish freeways after rumble strips were added» *ScienceNordic,,* 2013.

[103] Transportation Research Board, «Guidelines for Selection of Speed Reduction Treatments at High-speed Intersections» Transportation Research Board, 2008.

[104] State Highway Administration., «Guidelines for Application of Rumble Strips» 2011.

[105] E. Hirasaki, S. T. Moore, T. Raphan et B. Cohen, «Effects of walking velocity on vertical head and body movements during locomotion» *Exp Brain Res,* n°1127, pp. 117-130, 1999.

[106] M. Slater, C. Guger, G. Edlinger, R. Leeb, G. Pfurtscheller, A. Antley et M. Garau, «Analysis of physiological responses to a social situation in an immersive virtual environment» *PRESENCE-TELEOPERATORS AND VIRTUAL ENVIRONMENTS,* vol. 15, n°15, pp. 553 - 569, 2006.

Annexes

Questionnaire de propension à l'immersion (QPI)

No dossier _____ Date _____

QUESTIONNAIRE SUR LA PROPENSION À L'IMMERSION
Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO*
(2002)

Indiquer votre réponse en inscrivant un "X" dans la case appropriée de l'échelle en 7 points. Veuillez prendre en compte l'échelle en entier lorsque vous inscrivez vos réponses, surtout lorsque des niveaux intermédiaires sont en jeu. Par exemple, si votre réponse est "une fois ou deux", la deuxième case à partir de la gauche devrait être utilisée. Si votre réponse est "plusieurs fois mais pas extrêmement souvent", alors la sixième case (ou la deuxième à partir de la droite) devrait être utilisée.

1. Devenez-vous facilement et profondément absorbé(e) lorsque vous visionnez des films ou des téléromans?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT

2. Vous arrive-t-il d'être tellement absorbé(e) dans une émission de télévision ou un livre que les gens autour de vous ont de la difficulté à vous en tirer?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT

3. Jusqu'à quel point vous sentez-vous mentalement éveillé(e) ou vif(ve) d'esprit en ce moment même?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS ÉVEILLÉ(E) MODÉRÉMENT COMPLÈTEMENT
ÉVEILLÉ(E)

4. Vous arrive-t-il d'être tellement absorbé(e) dans un film que vous n'êtes pas conscient(e) des choses qui se passent autour de vous?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT

5. À quelle fréquence vous arrive-t-il de vous identifier intimement avec les personnages d'une histoire?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT

6. Vous arrive-t-il d'être tellement absorbé(e) dans un jeu vidéo que vous avez l'impression d'être à l'intérieur du jeu plutôt qu'en train de manoeuvrer des manettes de jeu et de regarder un écran?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT
7. Comment vous sentez-vous au plan de la forme physique aujourd'hui?
|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS EN FORME MODÉRÉMENT EXTRÊMEMENT
BIEN BIEN
8. Dans quelle mesure êtes-vous efficace pour vous couper des distractions extérieures lorsque vous êtes en train de faire quelque chose?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS TRÈS PLUTÔT TRÈS BON(NE)
BON(NE) BON(NE)
9. Lorsque vous assistez à un match sportif, vous arrive-t-il de devenir tellement pris(e) par le match que vous réagissez comme si vous étiez un des joueurs?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT
10. Vous arrive-t-il d'être tellement absorbé(e) dans des rêveries, en plein jour, que vous n'êtes pas conscient des choses qui se passent autour de vous?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT
11. Vous arrive-t-il d'avoir des rêves qui semblent tellement réels que vous vous sentez désorienté(e) au réveil?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT
12. Quand vous faites du sport, vous arrive-t-il d'être à ce point absorbé(e) que vous perdez la notion du temps?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT

13. Dans quelle mesure arrivez-vous à vous concentrer lors d'activités plaisantes?
|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT MODÉRÉMENT TRÈS BIEN
BIEN
14. À quelle fréquence jouez-vous à des jeux vidéos? (SOUVENT devrait correspondre à tous les jours, ou tous les deux jours, en moyenne)

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT
15. Vous est-il déjà arrivé(e) d'être excité(e) lorsque vous visionnez une scène de poursuite ou de combat à la télévision ou dans un film?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT
16. Vous est-il déjà arrivé(e) d'être apeuré(e) par quelque chose se produisant à la télévision ou dans un film?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT
17. Vous est-il déjà arrivé(e) de demeurer apeuré(e) longtemps après le visionnement d'un film d'épouvante?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT
18. Vous arrive-t-il de devenir absorbé(e) à un point tel dans une activité donnée que vous en perdez la notion du temps?
|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
JAMAIS À L'OCCASION SOUVENT
* Inspiré de la version originale de : Witmer, B.G. & Singer. M.J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, *7*(3), 225-240.
Dernière version : Mars 2013

Questionnaire sur la Propension à l'Immersion (QPI):

Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO

Validation :

- 94 participants ont rempli le questionnaire avant une immersion virtuelle;
- Les analyses factorielles ont été effectuées en composantes principales et avec des rotations varimax;
- Des corrélations inter-items ont été effectuées;
- Alpha de Cronbach = .78.

Cotation :

Total : items 1 à 18, sur une échelle de 1 à 7.

- Sous-échelle « Focus » : Items 1 + 2 + 3 + 8 + 13
- Sous-échelle « Implication » : Items 4 + 5 + 10 + 12 + 18
- Sous-échelle « Émotions » : Items 11 + 15 + 16 + 17
- Sous-échelle « jeu » : items 6 + 9 + 14

	Moyenne	**Écart type**
Total	64.11	13.11
Sous-échelle « Focus »	24.81	7.54
Sous-échelle « Implication »	15.33	8.67
Sous-échelle « Émotions »	14.25	6.70
Sous-échelle « jeu »	6.56	4.95

Questionnaire sur l'état de présence (QEP)

No dossier _____ Date _____

QUESTIONNAIRE SUR L'ÉTAT DE PRÉSENCE*

Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO

(2002)

Décrivez votre expérience dans l'environnement en marquant d'un "X" la case appropriée de l'échelle en 7 points, et ce en accord avec le contenu de la question et les étiquettes descriptives. Veuillez prendre en compte l'échelle en entier lorsque vous inscrivez vos réponses, surtout lorsque des niveaux intermédiaires sont en jeu. Répondez aux questions indépendamment les unes des autres et dans l'ordre dans lequel ils apparaissent. **Ne** sautez **pas** de questions et **ne** retournez **pas** à une question précédente afin de modifier votre réponse.

EN FONCTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LEQUEL VOUS ÉTIEZ

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

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|

PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

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

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|

PAS MODÉRÉMENT COMPLÈTEMENT
RÉACTIF RÉACTIF RÉACTIF

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

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|

EXTRÊMEMENT À MI-CHEMIN COMPLÈTEMENT
ARTIFICIELLES NATURELLES

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

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|

PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

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

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
EXTRÊMEMENT À MI-CHEMIN COMPLÈTEMENT
ARTIFICIELS NATURELS
6. Dans quelle mesure vos sens étaient-ils trompés par le réalisme du mouvement des objets à travers l'espace?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT MODÉRÉMENT TRÈS
TROMPÉS TROMPÉS
7. Dans quelle mesure les expériences que vous avez vécues dans l'environnement virtuel ressemblaient-elles à celles de l'environnement réel ?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS MODÉRÉMENT TRÈS
RESSEMBLANT RESSEMBLANT RESSEMBLANT
8. Étiez-vous capable d'anticiper les conséquences des mouvements que vous faisiez?
|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT
9. Jusqu'à quel point étiez-vous en mesure d'explorer activement l'environnement de façon visuelle?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT
10. Jusqu'à quel point la sensation de déplacement à l'intérieur de l'environnement virtuel était-elle confondante (réaliste)?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS MODÉRÉMENT TRÈS
CONFONDANTE CONFONDANTE CONFONDANTE

11. À quelle distance pouviez-vous examiner les objets?
|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS PROCHE PLUTÔT TRÈS
DU TOUT PROCHE PROCHE
12. Jusqu'à quel point pouviez-vous examiner les objets sous différents angles?
|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT
13. Jusqu'à quel point étiez-vous impliqué(e) dans l'expérience vécue dans l'environnement virtuel?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT MOYENNEMENT COMPLÈTEMENT
ENGAGÉ(E) ENGAGÉ(E) ABSORBÉ(E)
14. Jusqu'à quel point avez-vous ressenti un délai séparant vos actions de leurs conséquences?
|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
AUCUN DÉLAI LONG
DÉLAI MODÉRÉ DÉLAI
15. À quel rythme vous êtes-vous adapté(e) à l'expérience vécue dans l'environnement virtuel?
|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS ADAPTÉ(E) LENTEMENT EN MOINS
DU TOUT D'UNE MINUTE
16. En termes d'interactions et de déplacements dans l'environnement virtuel, jusqu'à quel point vous sentiez-vous compétent(e) à la fin de l'expérience?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS RAISONNABLEMENT TRÈS
COMPÉTENT(E) COMPÉTENT(E) COMPÉTENT(E)

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

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT ASSEZ TÂCHES
INCOMMODÉ(E) COMPLÈTEMENT
EMPÊCHÉES
18. Dans quelle mesure les mécanismes de contrôle de votre mouvement ont-ils interféré avec l'exécution des tâches requises?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT ASSEZ GRANDEMENT
INTERFÉRÉ INTERFÉRÉ
19. Jusqu'à quel point êtes-vous parvenu(e) à vous concentrer sur les tâches requises plutôt que sur les mécanismes utilisés pour effectuer lesdites tâches?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT
RÉPONDEZ SI L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL COMPRENAIT DES SONS :
20. Dans quelle mesure les aspects auditifs de l'environnement vous invitaient-ils à vous y impliquer?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT
21. Dans quelle mesure arriviez-vous à identifier correctement les sons produits dans l'environnement?

|_____|_____|_____|_____|_____|_____|_____|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT
22. Dans quelle mesure arriviez-vous à localiser correctement les sons produits dans l'environnement?

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

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

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

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

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

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

Dernière version: Mars 2013

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

Questionnaire sur l'État de Présence (QÉP)

Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO

Validation :

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

Cotation :

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

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

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

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

Questionnaire sur les cybermalaises

Questionnaire sur les cybermalaises***

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

Numéro_____ Date_____

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

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

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

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

Dernière version : Mars 2013

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

Questionnaire sur les Cybermalaises

Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO

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

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

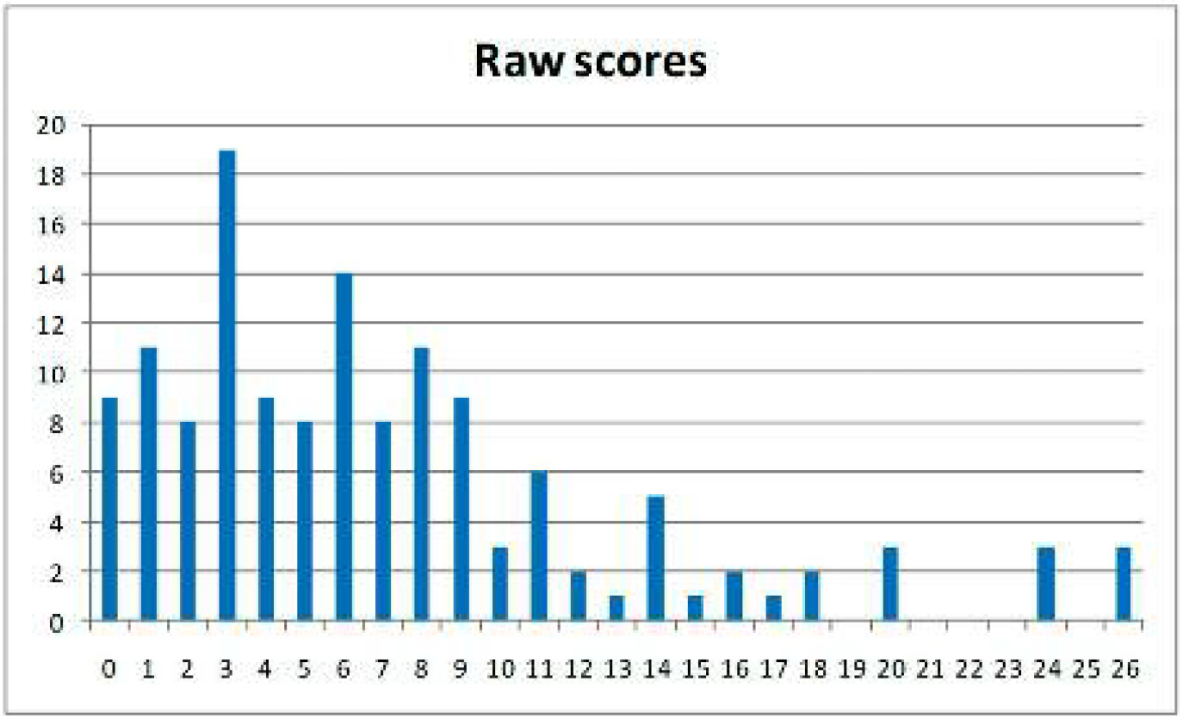
Pour consulter les articles scientifiques sur la validation canadienne-française de ce questionnaire, veuillez-vous référer aux articles suivants :

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

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

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

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



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

Apport des modalités vibratoires pour la navigation en environnement virtuel

RESUME :

La navigation en environnement virtuel est susceptible d'induire le mal du simulateur selon les conditions et le profil des utilisateurs. Le caractère potentiellement multimodal de la réalité virtuelle est susceptible d'apporter des solutions à ces problèmes tout en améliorant le sentiment de présence. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail de recherche est de déterminer quel est l'impact sur la simulation de l'apport des modalités vibratoires pour l'aide à la navigation dans un environnement virtuel.
Pour cela une taxonomie des méthodes de navigation est proposée. Il en résulte 4 types : concrète égo-centrée, concrète exo-centrée, abstraite égo-centrée et abstraite exo-centrée. Dans un premier temps, des vibrations utilisées pour simuler des bandes rugueuses lors d'une simulation de conduite sont étudiées. L'expérimentation permet de conclure que ces vibrations rendent le conducteur plus attentif à l'environnement et rendaient sa conduite plus sûre. Par la suite nous avons développé les 3 modalités vibratoires différentes suivantes, vibrations proprioceptives, vibrations synchronisées sur le pas et vibrations continues. L'évaluation de ces vibrations combinées avec différents type de méthode de navigation ont permis de montrer que les vibrations permettent de diminuer le mal du simulateur et d'augmenter le sentiment de présence. Ces travaux ont mis en évidence l'importance du choix de la modalité vibratoire à utiliser suivant l'effet souhaité en fonction de la méthode de navigation utilisée dans la simulation. Enfin, deux langages vibratoires ont été développés et évalués, le « Pushing pattern » et le « Compass Pattern ». L'évaluation de ces langages a monté que le « compass pattern » était plus performant pour guider l'utilisateur dans un environnement virtuel.
Mots clés : Réalité virtuelle, Navigation, Vibrations, Haptique, Environnement Virtuel

Contribution of vibrational modalities for navigation in virtual environments

ABSTRACT:

The virtual environment navigation may induce the simulator sickness depending on conditions and user profile. The potential virtual reality multimodality may provide solutions to these problems while improving the sense of presence. In this context, the objective of this research is to determine what is the impact of vibrational modalities for navigation in virtual environments on the simulation.
A taxonomy of navigation methods is proposed. It results in 4 types, specific egocentric, specific exocentric, abstract egocentric and abstract exocentric. First we simulate rumble strip vibrations during a driving simulation. The experimentation exposed that these vibrations make driver more aware about the environment and make his driving safer. We also develop 3 vibratory modalities, proprioceptive vibrations, footstep vibrations and continuous vibrations. Experimentations show that vibrations help reduce simulator sickness and increase the sense of presence depending on the used navigation method in the simulation. Last we develop and evaluate 2 vibration languages for guidance, Pushing pattern and Compas pattern. The evaluation expose that Compass pattern is better to guide the user.
Keywords : Virtual reality, Navigation, Vibrations, Haptic, Virtual Environment



ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY