

[Page de garde]

HEC MONTRÉAL

**Immersion en réalité virtuelle : Influence de mouvements vibro-
cinétiques synchronisés au média sur l'état physiologique et la qualité
de l'expérience vécue**

par

Alexandre Gardé

**Sciences de la gestion
(Option Technologie de l'Information)**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de maîtrise ès sciences en gestion
(M. Sc.)*

[Mois du dépôt final] 2018
© Alexandre Gardé, 2018

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

La présente atteste que le projet de recherche décrit ci-dessous a fait l'objet d'une évaluation en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains et qu'il satisfait aux exigences de notre politique en cette matière.

Puisque le niveau de risque de ce projet est plus que minimal, les modifications de projet (formulaire F8) et les renouvellements de certification (formulaire F7) **devront être approuvés par le comité en réunion plénière.**

Projet # : 2017-2638

Titre du projet de recherche : Évaluation de l'apport du mouvement vibra-kinétique sur le mal de la réalité virtuelle

Chercheur principal :

Pierre-Majorique Léger,
Professeur titulaire, Technologies de l'information - HEC Montréal

Cochercheurs :

Marc Fredette; Élise Labonté-Lemoyne; Sylvain Sénécal; Bertrand Demolin; Beverly Resseguier; David Briegne; Alexandre Gardé

Date d'approbation du projet : 29 mai 2017

Date d'entrée en vigueur du certificat : 29 mai 2017

Date d'échéance du certificat : 01 mai 2018



Maurice Lemelin
Président du CER de HEC Montréal

Résumé

Ce mémoire par articles porte sur une technologie émergente qui fait beaucoup parler d'elle : la Réalité virtuelle (RV). Il s'intéresse au mal qu'induit la RV, un obstacle qu'elle doit surmonter pour être adoptée à grande échelle : le mal de la RV. Nous traiterons plus précisément l'impact des mouvements d'un siège vibro-cinétique, i.e., un siège qui bouge et vibre en totale synchronisation avec ce que voit l'individu immergé en RV, sur l'expérience vécue par l'utilisateur en termes de mal de la RV, ainsi que sur son immersion et son état physiologique. D'innombrables expériences de RV ont vu le jour ces derniers temps. Dans notre cas, nous étudions l'impact de ces mouvements dans le contexte d'une expérience de RV impliquant un déplacement passif, sans interaction avec l'environnement virtuel, en position assise.

Pour mesurer rigoureusement son effet, une étude en laboratoire a été menée auprès de 45 participants afin de collecter les données psychophysiologiques et auto-rapportées de ces derniers. Dans l'optique de constituer deux groupes équilibrés, nous leur avons assigné une condition (avec mouvement ou sans mouvement) en fonction de leur âge de leur sensibilité au mal des transports. Une fois assis confortablement dans le siège avec le casque de RV correctement positionné, nous avons immergé nos participants 10 minutes en RV pendant lesquelles nous mesurons leur activité électrodermale (EDA) ainsi que l'activité électrique de leurs battements cardiaques (ECG). Les résultats suggèrent que les participants ayant vécu l'expérience avec le siège en mouvement connaissent un état physiologique plus optimal pour vivre l'expérience de RV, vivent des émotions plus intenses et sont plus présents dans l'immersion. Ces travaux nous enseignent donc que l'ajout de vibrations/mouvements dans le contexte d'immersion en RV bonifie non seulement l'expérience, mais sont aussi une piste de recherche non négligeable pour lutter contre le mal de la RV. Les contributions théoriques et les implications pour l'industrie sont discutées.

Mots clés : Réalité virtuelle, Mouvement, Mal de la Réalité virtuelle, Haptique, Psychophysiologique, ECG, EDA, Immersion

Abstract

This thesis by articles focusses on an emerging technology that is currently a trending topic: Virtual Reality (VR). It also looks into the disease that it induces and which continues to be an obstacle to its widespread adoption: cybersickness. More precisely, this research studies the impact of a vibrokinetic seat's movements (i.e. a seat that moves and vibrates in total synchronization with what the individual immersed in VR sees) on the experience of cybersickness, as well as on the experienced immersion and physiological state. In this study, we measure the impact of vibrokinetic movements on the experience of a passive VR stimulation. While seated, the participants experienced several visual stimuli where they were guided through different environments. The participants could not interact or influence the outcome, they could only modify the visual angle they perceived.

In order to rigorously measure the vibrokinetic seat's effects on overall VR experience, we collected psychophysiological and self-reported data from 45 participants. Participants were assigned to one of two conditions (movement or no-movement) according to their age and sensitivity to motion sickness. This was done to ensure that the possible differences found would not be skewed by the two groups being inherently different. Once seated comfortably with the head mounted device (HMD) correctly positioned, participants were immersed in VR for 10 minutes. During the immersion, participant's electrodermal activity (EDA), as well as the electrical activity of their heartbeats (ECG), were measured. The results suggest that participants who underwent the VR experience coupled with vibrokinetic seat movements, experienced a more optimal physiological state, more intense emotions and were more immersed in the experience. Our results seem to suggest that the addition of vibrations/movements in the context of VR immersion not only helps to improve the experience, but could even potentially help combat the effects of cybersickness. Further research is needed before such conclusions can be made, but this leaves open an important new avenue of research on the topic of cybersickness.

Keywords : Virtual Reality, Motion, Cybersickness, Haptic, Psychophysiological, ECG, EDA, Immersion

Table des matières

Résumé.....	iv
Abstract.....	v
Table des matières.....	vii
Liste des tableaux et des figures.....	xi
Liste des abréviations.....	xiii
Avant-propos.....	xv
Remerciements.....	xvii
Introduction.....	19
1. Mise en contexte de l'étude.....	19
2. Questions de recherche.....	21
3. Méthode et expérimentation.....	22
4. Structure du mémoire.....	22
5. Contribution.....	23
6. Informations sur les articles.....	23
6.1 Informations sur l'article 1.....	23
6.2 Résumé de l'article 1.....	24
6.3 Informations sur l'article 2.....	24
6.4 Résumé de l'article 2.....	24
6.5 Contribution à la rédaction des articles.....	25
Chapitre 1: Article accepté à CHI 2018.....	27
The Effects of a Vibro-Kinetic Multi-Sensory Experience in Passive Seated Vehicular Movement in a Virtual Reality Context.....	27
1. Abstract.....	27
2. Introduction.....	27
3. Method.....	29
4. Participants.....	29
5. Stimuli.....	30
6. Instrument and Mesures.....	31
7. Procedure.....	32

8. Conclusion	32
9. Results.....	33
10. Discussion	34
11. Conclusion.....	35
12. Références	36
Chapitre 2: Article accepté à EuroHaptics 2018.....	40
Virtual Reality: Impact of Vibro-Kinetic Technology on Immersion and Psychophysiological State in Passive Seated Vehicular Movement.....	40
1. Abstract	40
2. Introduction.....	41
3. Method	44
3.1 Sample and Design	44
3.2 Procedure and Stimuli	44
3.3 Instruments and Measures	46
4. Analysis.....	47
5. Results.....	47
6. Discussion and Conclusion	49
7. References.....	51
Conclusion	57
8. Sommaire	57
9. Rappel des questions de recherches	58
10. Contributions théoriques	59
11. Implication pour l'industrie.....	59
12. Limites et recherche future.....	60
Bibliographie.....	63
Annexes.....	i
Annexe 1: Questionnaire MSSQ.....	i
Annexe 2 : Questionnaire SSQ.....	iii
Annexe 3 : Méthodologie détaillée	iv
1. Recrutement	iv
2. Design expérimental	vii

3. Protocole expérimental.....	ix
4. Matériel	x
5. Sécurité du participant.....	xiii
6. Analyse.....	xiii
6.1 Tests sur les moyennes	xiii
6.2 Tests entre variables discrètes et continues	xiii
6.3 Régressions linéaires ARMA.....	xiv
Annexe 4 : Complément de littérature	xv
1. Réalité virtuelle	xv
1.1 Définition	xv
1.2 Industrie	xvi
2. Le mal de la réalité virtuelle.....	xviii
2.1 Définition	xviii
2.2 Théories du Mal des Transports.....	xx
2.3 Le système vestibulaire.....	xxi
2.4 Théorie des conflits sensoriels et de la verticale subjective	xxii
2.5 Théorie des conflits sensoriels	xxiv
2.6 Théorie écologique : la théorie du poison.....	xxv
2.7 Facteurs impactant l'apparition du mal de la Réalité virtuelle	xxv
3. Mesurer le Mal de la Réalité virtuelle.....	xxvii
3.1 Questionnaires	xxvii
3.2 Indicateur physiologique.....	xxx

Liste des tableaux et des figures

Liste des figures :

Figure 1. Répartition du score MSSQ Femme-Homme.....	vi
Figure 2. Répartition du score MSSQ en fonction de la condition	vii
Figure 3. Score du MSSQ par condition	vii
Figure 4. Déroulement de l'expérimentation.....	viii
Figure 5. Oculus Rift CV1	xii
Figure 6. Représentation de l'anatomie de l'appareil vestibulaire (Blouin, 2004)	xxii
Figure 7. Représentation de l'influence du système nerveux sympathique et parasymphatique sur les différents organes du corps humain.....	xxxii
Figure 8. Senseurs placés pour mesurer l'EDA.....	xxxiii

Liste de tableaux :

Tableau 1. Responsabilité de l'étudiant dans ce projet de recherche	25
Tableau 2. Récapitulatif des participants à l'étude	v
Tableau 3. Liste des équipements utilisés pour l'expérimentation	x
Tableau 4. Liste des logiciels utilisés pour l'expérimentation.....	xi
Tableau 5. Caractéristiques techniques du CV1	xii
Tableau 6. Définitions de la RV vues dans la littérature.....	xv
Tableau 7. Symptômes communs au mal de la réalité virtuelle.....	xix
Tableau 8. Qualification du score SSQ.....	xxix

Liste des abréviations

CER = Comité d'éthique de la recherche

D-BOX = D-BOX Technologies Inc.

ECG = Électrocardiogramme

EDA = Activité Electrodermale

EV = Environnement Virtuel

HF = Hautes fréquences (cardiaques)

MdT = Mal des Transports

RV = Réalité Virtuelle

RA = Réalité Augmentée

VR = Virtual Reality

Avant-propos

Ce mémoire par articles a été soumis avec l'autorisation de la direction du programme de maîtrise ès sciences en gestion de HEC Montréal. Les coauteurs de chaque article ont donné leur consentement pour leur présentation dans ce mémoire. De plus, le comité d'éthique de la recherche (CER) de HEC Montréal a approuvé le projet de recherche sur lequel se fonde ce mémoire.

Le premier article se concentre sur l'identification de l'état psychophysiologique des utilisateurs qui vivent l'expérience de réalité virtuelle avec le fauteuil en mouvement en comparaison avec ceux qui vivent l'expérience sans retours haptiques.

Le deuxième article complète les résultats trouvés dans le premier en y ajoutant les données de mouvement de la tête. Cet article permet notamment d'approfondir la notion d'immersion et de sentiment de présence dans la réalité virtuelle.

Le premier article a été soumis et accepté dans sa version « Late Breaking Work » à la conférence CHI 2018 qui eut lieu du 21 au 26 avril 2018. Le deuxième article a quant à lui été accepté et sélectionné pour être présenté à la conférence d'Eurohaptics 2018.

Enfin, un reportage portant ce projet de recherche a été réalisé par Découverte de ICI Radio-Canada et fut diffusé le 15 avril 2018.

Remerciements

Ce projet de recherche n'aurait pas pu voir le jour sans l'implication de plusieurs personnes que je tiens à remercier ici.

Tout d'abord, un grand merci à mon directeur de recherche, Pierre-Majorique Léger, de m'avoir accordé sa confiance sur ce projet et permis d'intégrer son équipe au Tech3Lab. Plus qu'un simple directeur de mémoire, il a su jouer le rôle de mentor, m'a transmis sa vision de la recherche et permis de vivre des expériences au-delà de mes recherches et de mon mémoire en me donnant l'occasion d'interagir directement avec les partenaires et les médias en tant que porteur du projet.

Merci à mon codirecteur, Sylvain Sénécal, qui m'a prodigué de bons conseils et m'a appris la différence entre un simple article et un article scientifique digne de ce nom.

Merci à toute l'équipe du Tech3Lab, et particulièrement à Bertrand, David, Beverly, Vanessa et Élise, d'avoir su me transmettre le goût de la recherche et de m'accompagner depuis les prémisses du projet.

Merci aux assistantes, Emma, Salima, Ariel, Diana, Yasmine, Marianne et Myriam, qui m'ont conseillé dans mes périodes de doutes, m'ont aidé durant ma collecte, m'ont soutenu pendant les périodes de rush ainsi que pour leur bonne humeur bienveillante.

Merci aux autres étudiants, Christophe, Sébastien, Benjamin, Victoire et Michael pour les soirées passées à travailler sur nos projets et pour l'entraide constante qu'ils ont su entretenir depuis le début.

Merci à Mario et Gabrielle pour leurs regards nouveaux ainsi que pour avoir rendu les derniers mois de travail sur ce projet aussi stimulant et motivant.

Ce travail est bien plus qu'un simple mémoire. Grâce à chacune de ces personnes, mon expérience au Tech3Lab de HEC Montréal a dépassé mes attentes. Je ressors grandi de cette expérience et mes acquis dépassent le sujet de la réalité virtuelle. Grâce à eux, j'ai appris à travailler comme un véritable chercheur.

Enfin, merci à mes colocataires, Inès, Loïc, Hadrien et Chloé, sans qui ce mémoire aurait sûrement pu être terminé 3 mois plus tôt.

Introduction

« La réalité virtuelle cherche à tromper le cerveau, lui donnant l'illusion d'être dans le monde réel. Pour y parvenir, modifier la perception visuelle ne suffit pas. Si j'avance dans un monde virtuel tout en restant physiquement sur place, l'oreille interne va le percevoir avec un risque de désorientation et de nausées. Plus qu'un travail sur la machine, c'est une compréhension de l'humain qui va permettre à la réalité virtuelle de se démocratiser »

Sébastien Kuntz, fondateur de Middle VR, lors de la conférence IEEE VR 2015

1. Mise en contexte de l'étude

Réalité virtuelle (RV). Ces deux mots forment un parfait oxymore, un oxymore qui fait rêver beaucoup de monde. L'expression anglaise « Virtual reality » a été inventée dans les années 80 par un des pionniers de la réalité virtuelle : Jaron Lanier, cofondateur de VPL Research (Kelly, Heilbrun, & Stacks, 1989). Ce terme définit un environnement tridimensionnel, immersif, interactif, multisensoriel simulé par ordinateur (Cruz-Neira, 1993). Une personne immergée en réalité virtuelle se retrouve « plongée dans un monde virtuel englobant où elle pourra promener son regard [...] s'y déplacer et interagir » (Audureau, 2015). La RV est à distinguer de la réalité augmentée qui consiste à simplement enrichir visuellement la réalité d'informations ou d'images générées par un accessoire dédié.

C'est grâce à l'univers du jeu vidéo que le grand public a entendu parler pour la première fois de RV. À cette époque, la compagnie VPL commençait tout juste à commercialiser le premier casque de RV (Mazuryk & Gervautz, 1996). Une trentaine d'années plus tard, la réalité virtuelle est sur toutes les lèvres et dans tous les domaines : armée, bâtiment, culture, divertissement, médecine ou encore dans le milieu industriel (Drexler, 2006).

La RV est en tête d'affiche dans les salons consacrés au divertissement et à l'innovation, comme lors du célèbre CES 2017 (Consumer Technology Association) qui s'est déroulé à Las Vegas. Startups, PME et grandes entreprises de tout horizon se livrent actuellement

une lutte acharnée pour savoir qui prendra les parts de ce marché qui n'en est qu'à ses balbutiements. D'après la société d'études anglaise CCS insight, les produits de réalité virtuelle et de réalité augmentée représentent un marché mondial de 4 milliards de dollars en 2018 (Wood, 2015)

Cette technologie ouvre de nouvelles possibilités, de nouveaux usages, un nouveau monde. Contrairement aux technologies dont on a l'habitude, celle-ci peut être reliée à tous les sens. Aujourd'hui, la 2D ne fait intervenir que 2 sens sur 5 : la vue et l'ouïe. Demain, la réalité virtuelle permettra d'utiliser non seulement le toucher et l'odorat (Halarnkar, Shah, Shah, Shah, & Shah, 2012; Mazuryk & Gervautz, 1996), mais permettra surtout d'immerger l'utilisateur dans une expérience visuelle et auditive à 360°, comme s'il y était.

Cette nouvelle technologie n'est encore accessible qu'à certains privilégiés, mais on en connaît déjà le frein : le mal de la réalité virtuelle, une forme de mal des transports (MdT) (« Motion Sickness »)(Fernandes & Feiner, 2016). Les termes « VR sickness » (VR pour Virtual Reality) et « cybersickness » sont les deux termes anglais qui sont utilisés pour faire référence au mal de la RV dans la littérature anglophone. Ces termes recouvrent une foule de maux qui se traduisent dans la plupart des cas par des nausées, des maux de tête ou tout simplement par un sentiment d'inconfort général (Abrams, Earl, Baker, & Buckner, 1971). Chaque être humain qui n'a pas subi de dommages à son système vestibulaire peut connaître les symptômes liés au MdT à un moment de sa vie (Ebenholtz, 1992).

Notre cerveau utilise principalement l'information provenant du système vestibulaire (aussi appelé oreille interne), du système proprioceptif (responsable de la perception de la position des différentes parties du corps) et du système visuel afin de maintenir notre équilibre (Annexe 4). Lorsque ces systèmes rapportent des informations qui ne s'alignent pas, le corps peut réagir avec le mal des transports ou de la réalité virtuelle, selon le contexte.

La principale théorie actuellement soutenue pour expliquer le mal de la réalité virtuelle est la théorie des conflits sensoriels, également connue sous le nom de réarrangement

sensoriel ou de théorie de l'incompatibilité neuronale. En bref, cette théorie soutient que les symptômes qui surviennent sont le résultat de conflits entre trois systèmes sensoriels: visuels, vestibulaires et proprioceptifs (Bouchard, Robillard, & Renaud, 2007).

Chez l'être humain, le système sensoriel vestibulaire, situé dans l'oreille interne, contribue à la sensation de mouvement et à l'équilibre (LaViola & Joseph, 2000). C'est ce système qui nous informe de l'orientation de notre corps par rapport à la gravité et qui signale au cerveau que nous nous déplaçons (Hromatka et al., 2015). De manière imagée, on peut comparer le système vestibulaire à l'accéléromètre de nos téléphones ou encore au niveau à bulle de certains outils de construction. Le système sensoriel proprioceptif contient quant à lui des détecteurs de pression et de vibration qui se situent au niveau de la peau et des articulations afin d'informer le corps de sa position dans l'espace et de la position de chacun de ses membres (Lavalle, 2015).

Un des travaux qui nous intéresse le plus sur le sujet est la thèse « Cybersickness Prioritization and Modeling » (Rebenitsch, 2015). Cette étude fait le point sur ce qui a été testé pour contrer le mal de la RV et indique que les retours haptiques combinés à une expérience de RV ne sont pas encore testés dans le cadre de la recherche sur le mal de la RV. De manière générale, l'haptique, qui vient du grec ἅπτομαι (haptomai) et qui signifie « je touche », concerne à la fois le toucher et les phénomènes kinesthésiques. En d'autres termes, on parle ici de travailler sur la perception du corps dans l'environnement virtuel pour pallier le mal de la RV. C'est une opportunité que l'entreprise D-BOX Technologies Inc. (D-BOX) a décidé d'étudier et de nous confier dans la cadre de la Chaire de recherche industrielle CRSNG-Prompt en expérience utilisateur. Leur problématique est de savoir dans quelle mesure leur produit, un siège à retour haptique vibro-cinétique, qui bouge en fonction d'un film ou d'une expérience de RV, peut réduire les effets liés au mal de la RV chez l'utilisateur.

2. Questions de recherche

L'objectif de ce mémoire est donc d'étudier de quelle manière les mouvements du fauteuil vibro-cinétique influencent l'expérience en RV d'un individu et s'ils permettent de réduire

l'apparition de symptômes liés au mal de la RV. On peut donc poser les questions de recherches suivantes :

Q1 : Le mouvement vibro-cinétique contribue-t-il à améliorer l'expérience de l'utilisateur immergé en RV?

Q2 : Le mouvement vibro-cinétique contribue-t-il à générer un état vécu propice au contexte de la RV?

Q3 : Le mouvement vibro-cinétique contribue-t-il à mieux immerger ses utilisateurs et à augmenter leur sentiment de présence?

Trouver des solutions au mal de la RV est un enjeu majeur pour cette nouvelle technologie. Cette dernière ne peut en effet pas prétendre conquérir le monde et révolutionner nos usages si elle rend l'usager malade au bout de quelques minutes.

3. Méthode et expérimentation

Pour comprendre l'origine de ce problème et tenter de le résoudre, nous nous avons donc utilisé la technologie de D-BOX. Cette compagnie propose un fauteuil vibro-cinétique qui est muni de 3 actuateurs permettant de créer du mouvement sur 3 axes dans le but d'imiter les mouvements que subit l'utilisateur dans son expérience de réalité virtuelle. Cette technologie utilise un logiciel capable de gérer du code de mouvement (« motion code ») qui permet de produire des vibrations et des mouvements en fonction d'un média donné ; dans notre cas, l'expérience de RV.

Pour étudier l'impact d'un tel fauteuil sur l'expérience vécue de ses utilisateurs, nous avons mené une étude inter-sujets et avons récolté les données rapportées et vécues de 45 participants (23 avec le fauteuil en mouvement et 22 avec le fauteuil immobile). Ces participants ont vécu une immersion de 10 min en RV où ils avaient simplement à se laisser balader, sans avoir à interagir, tout en étant assis dans fauteuil. Pendant ce temps-là, l'activité électrodermale (EDA) ainsi que le rythme cardiaque (ECG) ont été mesurés.

4. Structure du mémoire

Les articles soumis sur ce sujet et qui répondent à nos questions de recherche sont présentés en première et seconde partie. Une annexe méthodologique (Annexe 3) vient

compléter ce mémoire avec l'ensemble des questionnaires (Annexe 1 et 2) utilisés ainsi qu'une description précise des éléments de l'expérience qui a été menée. Comprendre l'être humain est primordial pour comprendre les origines du mal de la RV. C'est pourquoi ce mémoire présente en Annexe 4 l'état de l'art et les connaissances essentielles à la compréhension de ce mal.

5. Contribution

Du point de vue de la recherche, elle ne comprend pas encore de travaux qui visent à étudier l'impact des retours haptiques, comme ceux induits par le fauteuil que nous utilisons, sur le mal de la RV (Rebenitsch, 2015). La présente étude tend à enrichir ce champ de recherche en analysant l'effet des retours haptiques produits par le fauteuil que nous utilisons. Elle propose d'apporter un nouveau regard sur la question, plus spécifiquement dans le cas d'expériences en RV où le participant est assis et se laisse entraîner dans l'expérience sans être tenu d'interagir directement avec l'environnement virtuel. Nos résultats constituent un axe de recherche concernant les mesures physiologiques sur lequel les chercheurs peuvent s'appuyer pour établir si leur expérience de RV permet à l'individu de rester dans un état stable, propice à une expérience de RV optimale. Nous espérons ainsi que la présente recherche ouvre la voie à l'étude de l'impact des retours haptiques sur le mal de la RV, et que ses résultats positifs encourageront les chercheurs à combler ce manque dans la littérature.

Du point de vue de l'industrie, nos résultats sur les effets des mouvements sur ce que vit l'utilisateur attestent que, pour vivre une expérience de RV réellement immersive, il faut penser au-delà du casque de RV. En effet, notre étude montre que les technologies vibrocinétiques sont une opportunité pour lutter contre le mal de la RV, mal qui constitue aujourd'hui le plus grand obstacle à l'adoption de la RV à grande échelle.

6. Information sur les articles

6.1 Informations sur l'article 1

Ce premier article a été soumis une première fois à CHI 2018 (« Computer Human Interaction ») en septembre 2017 dans la catégorie « Multimedia Information Systems : Artificial, augmented, and virtual realities » mais n'a pas fait partie des 3% finalistes dont

articles ont été acceptés. Il a été amélioré et soumis une nouvelle fois à CHI 2018 dans cette même catégorie en tant que Late Breaking Work le 15 janvier 2018 et a finalement été accepté. L'auteur de ce mémoire présentera ce travail à la conférence CHI 2018 qui aura lieu du 21 au 26 avril 2018 à Montréal. Seules les données EDA et ECG ont été utilisées pour réaliser cet article.

6.2 Résumé de l'article 1

Cet article étudie l'effet de la technologie vibro-cinétique (VC) sur les états psychophysiologiques des utilisateurs dans un contexte de réalité virtuelle. Plus précisément, nous étudions si un siège VC, c'est-à-dire un siège utilisant le mouvement et les vibrations synchronisées avec un média donné, induit un état psychophysiologique aligné avec une expérience de RV immersive optimale. Nous testons nos hypothèses avec des sujets en position assise tout en expérimentant un mouvement de véhicule passif avec un casque VR. Quarante-cinq participants ont été assignés aléatoirement à une condition VC ou non-VC. En plus des perceptions des utilisateurs, leurs états psychophysiologiques ont été mesurés en utilisant l'activité électrodermale et la fréquence. Nous trouvons des preuves que la condition VC améliore significativement l'activation physiologique de l'utilisateur tout au long de l'expérience. En outre, nous constatons que la condition VC semble créer un état psychologique qui nécessite moins d'autorégulation consciente, ce qui pourrait suggérer que les utilisateurs éprouvent moins de mal de la RV dans cette condition.

6.3 Informations sur l'article 2

Ce deuxième article a été soumis à la conférence Eurohaptics 2018 le 29 janvier 2018 dans la catégorie « Haptic Technology ». Il a été accepté pour une présentation le 30 mars 2018. Pour cet article, l'auteur de ce mémoire a utilisé une partie des données de l'expérience qui ont été utilisées dans le premier article et y a ajouté les données de mouvement de la tête.

6.4 Résumé de l'article 2

Dans cet article, nous étudions l'effet d'un siège vibro-cinétique, c'est-à-dire un siège utilisant le mouvement et les vibrations synchronisés avec un média donné, sur les états

psychophysiologiques et les mouvements de tête des utilisateurs immergés dans la RV. Le but de cette étude est d'explorer la mesure dans laquelle un siège vibro-cinétique peut contribuer à créer une expérience de RV plus immersive qu'avec un siège classique, incluant moins de symptômes d'inconfort liés au mal de la RV. Nous testons notre hypothèse avec un design inter-sujets où nous avons assigné 45 participants à une des deux conditions suivantes: Condition vibro-cinétique (avec le siège se déplaçant selon l'expérience de réalité virtuelle) ou condition non-vibro-cinétique (où le siège était immobile). Les états physiologiques des utilisateurs ont été capturés en utilisant l'activité électrodermale et la variabilité de la fréquence cardiaque. Les mouvements de tête des utilisateurs ont été capturés à l'aide de la détection vidéo automatique. Les résultats suggèrent que la condition vibro-cinétique conduit à plus d'immersion et à un meilleur état psychophysiologique pour vivre une expérience de réalité virtuelle plus optimale sans symptômes de mal de la RV. En outre, sur la base de la détection du mouvement de la tête, le siège vibro-cinétique semble contribuer à augmenter les mouvements de la tête pour un grand nombre d'utilisateurs, ce qui indique une présence accrue dans la réalité virtuelle. De plus, les utilisateurs en condition vibro-cinétique vivent une expérience améliorée et sont davantage immergés dans l'expérience VR.

6.5 Contribution à la rédaction des articles

Le tableau suivant (Tableau 1) a pour but de clarifier le rôle de l'auteur de ce mémoire dans ce projet de recherche réalisé avec l'équipe du Tech3Lab et le partenaire.

Tableau 1. Responsabilité de l'étudiant dans ce projet de recherche

Étape du processus	Contribution
Définition des requis du partenaire industriel	Clarifier les attentes et les besoins du partenaire en question de recherche – 60% <ul style="list-style-type: none"> ▪ Définir les hypothèses à tester pour l'expérience ▪ Établir le champ des possibilités avec le matériel à disposition et le délai imparti
Revue de littérature	Recherche et état de l'art sur les sujets concernés – 100% Définition des outils de mesure utilisés – 80%

	Rôle de l'équipe du partenaire : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Choix et procuration des stimuli
Conception du design expérimental	<p>Conception du protocole d'expérimentation – 80%</p> <p>Test afin de vérifier si les outils, l'enchaînement des tâches et l'ensemble de l'expérience fonctionne parfaitement - 80%</p> <p>Montage de la salle de collecte – 80%</p> <p>Rôle de l'équipe du partenaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fournir le fauteuil vibro-cinétique ainsi que l'ordinateur et le casque de réalité virtuelle nécessaire à l'expérience
Recrutement	<p>Questionnaire de recrutement – 100%</p> <p>Recrutement des participants : Contacter, programmer et solliciter la participation – 100%</p> <p>Suivi des participants : assignement à une condition, recrutement en fonction du genre et sensibilité au mal des transports – 100%</p>
Prétests et collecte	<p>Entrevue avec les participants – 100%</p> <p>Chargé des opérations pendant la période de collecte – 100%</p> <p>Support technique et responsable du matériel de réalité virtuelle – 100%</p> <p>Gestion du classeur du projet : suivi participants et suivi compensation – 90%</p> <p>Veiller au bien-être des participants pendant l'étude (secourisme) – 100%</p>
Extraction et transformations des données	<p>Traitement des données rapportées – 100%</p> <p>Traitement des données physiologiques : Extraction, affinage, trie -100%</p> <p>Placement des marqueurs pour synchronisation des données – 100%</p>
Analyse des données	<p>Préparation des fichiers pour analyses statistiques – 100%</p> <p>Élaboration des hypothèses à tester – 90%</p> <p>Analyse statistiques (statistiques descriptives, analyses résultats explicites) – 50%</p>
Rédaction	<p>Écriture et soumission des articles – 100%</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Les autres auteurs ont effectué plusieurs retours afin d'améliorer les articles jusqu'à la version finale qui a été validée avec chacun d'eux

Chapitre 1: Article accepté à CHI 2018

The Effects of a Vibro-Kinetic Multi-Sensory Experience in Passive Seated Vehicular Movement in a Virtual Reality Context

Alexandre Gardé, Pierre-Majorique Léger, Sylvain Sénécal, Marc Fredette, Élise Labonté-Lemoyne et Jean-François Ménard

1. Abstract

This paper investigates the effect of vibro-kinetic (VK) technology on psychophysiological states of users in a virtual reality context. Specifically, we investigate whether a VK seat, i.e., a seat using movement and vibration synchronized with a given media, induces psychophysiological states aligned with an optimal immersive virtual reality (VR) experience. We test our hypotheses with subjects in a seated position while experiencing a passive vehicular movement with a VR headset. Using a between-subject experiment, 45 participants were randomly assigned to a VK or a non-VK condition. Users' psychophysiological states were measured using electrodermal activity, heart rate, and user perceptions. We find evidence that VK significantly enhances the physiological activation of the user throughout the experience. Also, we find that VK seems to create a psychological state that requires less conscious autoregulation, which could suggest that users experience less cybersickness in this condition.

Keywords: Vibro-kinetic; virtual reality; cybersickness; psychophysiological; movement; motion sickness; immersion, parasympathetic, haptic feedback.

2. Introduction

This paper investigates the effect of vibro-kinetic (VK) technology on psychophysiological states of users in a virtual reality context. Specifically, we investigate whether a VK seat, i.e., a seat using movement and vibration synchronized with a given

media, induces psychological states aligned with an optimal immersive virtual reality (VR) experience.

VK technology can be defined as artefacts providing whole-body motion and vibration feedback (0-100 Hz frequency response) synchronized with the media scenes. This relatively new technology manages a specific type of media channel called motion code, which produces motions and vibrations synchronized with a given media. The artefact produces haptic feedback that can generate, for example, the feeling of a strong impact during a scene with a car crash or the feeling of weightlessness during a scene with reduced gravity. It actively produces feedback to reinforce the audiovisual input from the media. In the case of this article, the seat used generates multiple vibrations and trembling motions according to what the user sees in the virtual world. For instance, if the user goes down a rollercoaster, the VK seat provides a sensation of a wagon shaking violently in contact with train rails.

VR, or Virtual Environment (VE), is a computer-simulated environment [11]. It corresponds to a range of technologies that enables immersion of the user in real-time in a three-dimensional space, inspired by human imagination or recreated from reality. VR experiences are developed to deeply immerse the user in the experience, the aim being to make him/her really “live the experience” as if he/she was there. Visch characterizes immersion as an illusion of physical presence [22]. Other authors [3,14,20,23] also talk of this feeling of “presence” related to the experience of “being there” when it comes to VR. Moreover, inducing a feeling of presence in VR is essential for living an emotive experience [17]. In the context of this study, we are specifically investigating VR in the context of a head mounted device (HMD).

We argue that VK can contribute to a psychophysiological state that is likely to help to maintain the user in an optimal immersive experience. Building upon previous work [15], we hypothesize that VK stimulates the autonomic nervous systems (ANS) into a more immersive state in a VR context. In other words, we argue that the VK seat creates a psychophysiological state that is more compatible with an immersive experience; an enhanced emotional experience that helps bridge the gap between virtual and physical

realities. We specifically hypothesize that VK technology stimulates the sympathetic nervous system (H1). This system prepares the organism for action in response to a stress, also called the “fight or flight” reaction. At the same time, we hypothesize that VK technology contributes to a less conscious autoregulation of the parasympathetic nervous system (PNS, H2). This system has the inverse effect of the ANS. It induces a relaxation response to the body. Heart rate and respiratory activity slow down and blood pressure decreases [2] to help one reach a homeostatic state. Conscious autoregulation makes reference to the phenomenon of taking control of his/her diaphragmatic breathing to calm down. This conscious control increases heart rate variability and lowers heart rate [4]. Research shows a strong correlation between HF and respiration [9,21] and also highlights the positive impact of respiration on PNS [13].

To test our hypothesis, we conducted an experiment in order to compare psychophysiological responses when using (or not) a VK seat in a VR environment. In support of our hypotheses, our results show differences both at the sympathetic and parasympathetic levels when using VR with a VK seat.

3. Method

During the lab experiment, participants were in a seated position while experiencing a passive vehicular movement with a VR headset. We conducted a between-subject experiment in which 45 participants were assigned to a VK or a non-VK condition during a 10 minute experience. To ensure that our sample would be balanced at the end of the data collection, each participant was assigned to a condition in function of their gender and susceptibility to motion sickness. This experiment was authorized by the ethical committee of our institution. Subjects received a \$30 compensation for their participation.

4. Participants

The Motion Sickness Susceptibility Questionnaire (MSSQ; [8]) was used to recruit subjects with a large range of motion sickness susceptibility, which is a known issue in VR experience [16]. Higher MSSQ score means that an individual should be more sensible to motion sickness. Figure 1 shows the distribution of participants based on their

MSSQ score and gender. To reduce potential biases related to recent VR experiences, participants must have had no VR usage in the last 30 days. Also, participants had to be able to use a VR headset with no glasses. The sample was composed of 24 males and 22 females with an average age of 24-year-old (4.9 standard deviation). Twenty-four (24) participants (12 males) were assigned to the VK condition and 22 (10 females) to the non-VK condition.

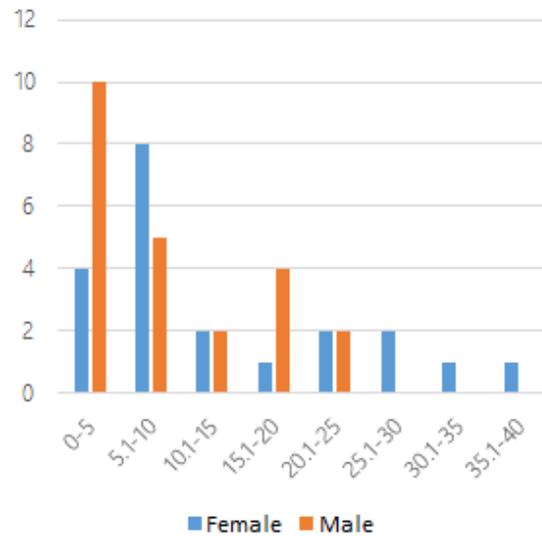


Figure 1. Distribution of MSSQ scores.

5. Stimuli



Figure 2. Experimental montage

We designed a 10-minute stimuli composed of three consecutive short VR segments; 1) two laps as a co-pilot in a race car, 2) a roller coaster ride, and 3) a cartoon snow ride. In this three VR experiences, participants saw the scene from the point of view of a passenger of car or wagon. They were always seated and could not interact with the VE. They just

have to passively enjoy the experience. All participants experienced the stimuli in the same order. A D-Box (Longueuil, Canada) VK seat specifically designed for VR was used. The D-Box seat is a motion-enabled chair. This enhanced seat has its movements manually designed by specialized movement artists. The seat was activated in the VK condition only. An Oculus Rift Cv1 (Menlo Park, CA) was used to present the stimuli (see Figure 2). We compared the two groups in terms of their Motion Sickness Susceptibility (self-reported before the experiment stimulus) using the MSSQ [8] and no significant difference was found ($p > .05$), showing that both groups were equivalent on this important aspect.

6. Instrument and Measures

Sympathetic nervous system (SNS) reactions were measured using electrodermal activity (EDA). EDA refers to the variation in the electrical properties of the skin in response to sweat secretion by the eccrine sweat glands [5] influenced by the SNS activity. The physiological basis of EDA is an autonomous (involuntary) reaction that occurs in the skin and subcutaneous tissues in response to emotional affect. In other words, an intense emotion will activate the glands in the palms of the hands. Thus, with specific sensors, it is possible to measure the skin conductance level (SCL). SCL is the amplitude of the tonic EDA signal at the time the stimulus was delivered. It corresponds to the tonic level of the electrical conductivity of the skin and it allows to measure the continuous emotional arousal of the participant.

Parasympathetic nervous system (PNS) reactions were measured using high frequency (HF) of heart rate variability (HRV). The activation of the PNS, or vagal system, corresponds to a relaxation response. It induces a general slowdown in the functions of the organism (i.e., slower heart rate and respiratory activity; [2]). HF are generated by the heart (0.15-0.4 Hz; [6,12]). Several articles present HF as a self-regulating index [18] and consider HF as proxy of regulatory strength, i.e., the ability to exert self-control and to override or alter one's dominant response tendencies [7]. In other words, an increase of HF indicates that participants try to regulate themselves by focusing on their respiration in order to take deeper and longer breaths.

Both EDA and HRV were captured using Biopac wireless sensors (Goleta, USA). Noldus Observer XT (Wageningen, Pays-Bas) was used to synchronize the presentation of the experimental stimuli with the D-BOX Cinemotion player (Longueuil, Canada). Biopac Acknowledge (Goleta, USA) was used to analyze EDA and ECG data.

Measuring tool	Variable Name	Description
Electrodermal activity sensor (EDA)	Skin Conductance Level (SCL)	Normalized amplitude of the tonic EDA signal at the time the stimulus was delivered.
Heart rate sensor (ECG)	High frequency (HF)	Frequency between (0.15-0.4 Hz) due to the modulation of the parasympathetic outputs.

Table 2. Measures

7. Procedure

After signing their participation consent and the physiological montage completed, participants were seated on a VR seat, and equipped with the HMD. Once given the experiment instructions, they were told that they could stop the experiment at any time if they felt any cybersickness discomfort. We had every participant perform a baseline measurement of 1 minute and 30 seconds for stabilizing the equipment before the experiment. Fifteen (15) subjects requested to interrupt the experiment before the end of the experiment (no difference between conditions, p -value = .596). On average, participants saw 90.0% of the VR stimuli (no difference between conditions, p -value = .503). A pretest was conducted ($n=7$) to ensure that participants clearly understood the instructions and the questions.

8. Conclusion

SCL can be modeled with time series since their fluctuations depend on their past value. Thus, an autoregressive model was used to analyze SCL data. Here, we used a linear model on the time series of the electrodermal activity level (SCL). We aim to test whether the time coefficient (the increase of the electrodermal activity during the experiment) is different for those in the VK condition compared to those who were not. Because participants could stop whenever they wanted their VR experience, two time periods were

analyzed: the last 60 seconds of the subject experience and the whole experience. Moreover, when comparing the means of physiological measurements between the two groups of participants, heteroskedastic Student tests with unequal variances were performed.

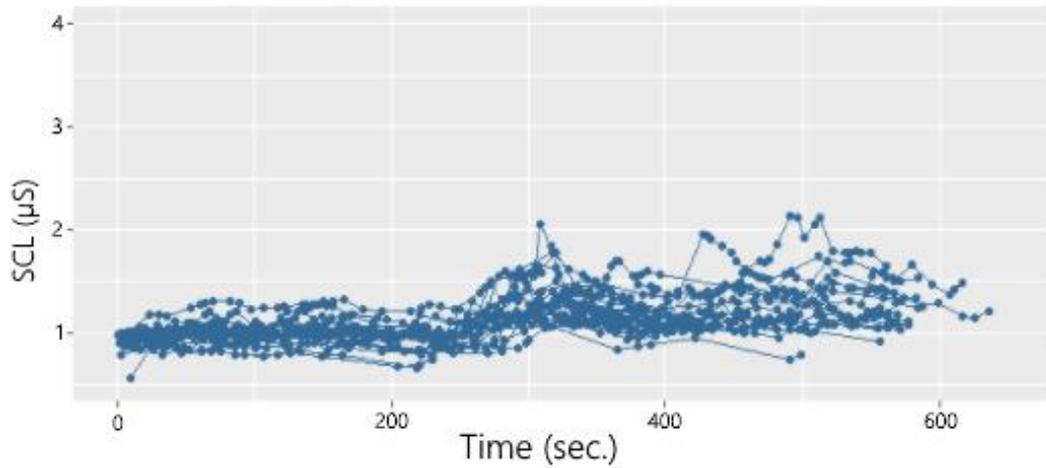


Figure 3. Electrodermal activity (Non-VK Condition).

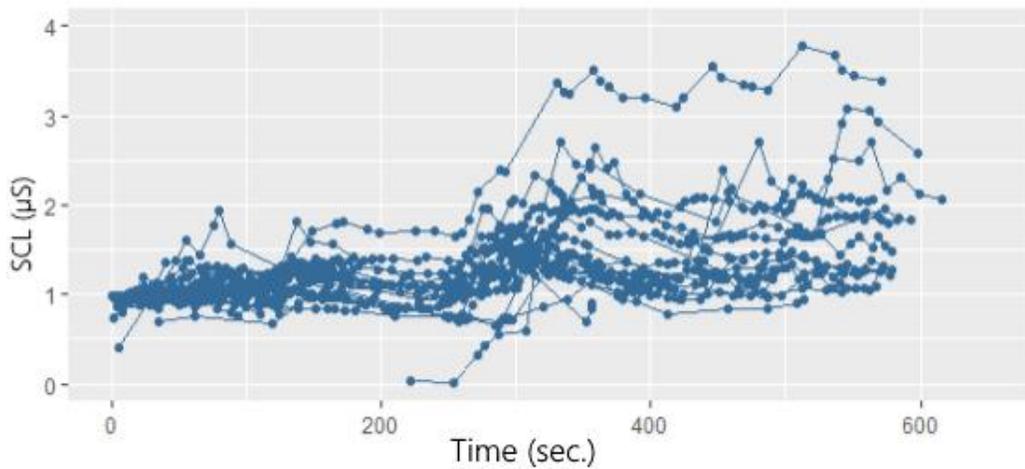


Figure 4. Electrodermal activity (VK Condition).

9. Results

Hypothesis 1: Figures 3 and 4 show the electrodermal activity of participants over time for each condition during all the experience. Participants in the VK condition show

significantly greater activation than non-VK participants. Time coefficient of the autoregression model is significantly different between conditions (p-value = 0.0134). The VK condition increases SCL 30.46% faster compared to non-moving seat. These results shows clear support for H1: VK leads to more activation of the sympathetic nervous system.

Hypothesis 2: To compare participants HF between VK and non-VK conditions, we use a HF ratio. This ratio represents the HF average for the last minute of the stimuli experienced by the user divided by the HF average of the rest of the experience. As expected, a significant difference was found between the HF of the groups (p-value = .040). Our results show that the HF increased by 134,6% in the non-VK condition compared to only 80,7 % in the VK condition in the last minute of the VR experience (Figure 5). Our results provide support for H2 and suggest that participants in the VK condition had better autoregulation.

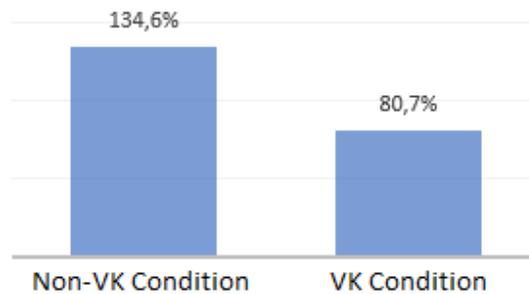


Figure 6. HF ratio in Non-VK and VK condition.

10. Discussion

Overall, our experimental results shows that VK technology contributes to induce a psychophysiological state that is more compatible with an optimal immersive VR experience. In this state, participants do not need to make a special effort to relax, to control their breathing due to an uncomfortable feeling. On the one hand, EDA with SCL show that VK significantly enhances the emotional reactions in a VR context (H1). Participants in VK condition live an experience globally more intense that participants in non-VK condition. Based on our results, VK technology could generate 30% more emotional response in a VR context. On the other hand, VK helps the user to be less conscious of the normal autoregulation progress that one needs to engage in to maintain

a homeostatic state (H2). Overall, results point to VK technology as potentially more optimal way to experience VR as it places the user in a context that can be more favorable to the emergence of an optimal immersive state.

To our knowledge, this research is the first to empirically test the effect of VK technology on VR experience [16]. Thus, it contributes to the VR literature by providing initial insights about the positive effect of VK technology in a head mounted device VR context. Furthermore, our findings about the relationship between VK technology and autoregulation are relevant for cybersickness research. Cybersickness, also named VR sickness, is a specific form of motion sickness that occur in virtual environment contexts [19]. It results in most cases by feeling symptoms like nausea, headache, or simply by a feeling of general discomfort [1]. By helping to better autoregulate, VK technology may potentially improve VR experiences.

Our results are relevant for the VK and VR industries. They show that VK technology in a VR context improves users' emotional reaction and help them to auto-regulate. Since cybersickness is an important issue for the VR industry [10] and its massive adoption, the VR industry should investigate further how VK technology can help reduce their users' cybersickness. VK technology could be instrumental in creating VR conditions that are less prone to cybersickness. However, more research is needed to ascertain this claim.

As in any experimental research, there are some limitations that need to be acknowledged. First, longer stimuli would need to be tested. In our experiment, most participants completed the task. A longer stimulus may have generated more withdrawals due to cybersickness. Repeat usage should also be investigated. Second, participants lived a passive VR experience in our experiment. Research should be conducted to test our hypotheses using an interactive VR task.

11. Conclusion

Taken together, results suggest that VK can significantly contribute to the VR experience. Not only were subjects physiologically more activated when experiencing VR in a VK seat, they also appeared to be in a psychological state that requires less conscious

autoregulation. Since motion sickness is a major issue when it comes to VR experiences, technologies such as VK may help users cope with this issue.

12. Références

1. C Abrams, W K Earl, C H Baker, and D N Buckner. 1971. Studies of the effects of sea motion on human performance. Office of Naval Research, Technical Report: 791–796.
2. Mark F Bear and Barry W Connors. 2016. Neurosciences (4e édition): À la découverte du cerveau.
3. Jean-Marie Burkhardt, Benoit Bardy, AMD D. Lourdeaux. 2003. Immersion, Réalisme et Présence dans la conception et l'évaluation des Environnements Virtuels. *Psychologie Française* 48: 35–42.
4. F Cottin, C Médigue, and Y Papelier. 2008. Effect of heavy exercise on spectral baroreflex sensitivity, heart rate, and blood pressure variability in well-trained humans. *American Journal of Physiology - Heart and Circulatory Physiology* 295, 3: H1150–H1155. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00003.2008>
5. Michael E. Dawson, Anne M. Schell, and Diane L. Filion. 2000. The electrodermal system. *Handbook of Psychophysiology*, 200–223. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.04.037>
6. Adam Gacek. 2015. ECG signal processing, classification and interpretation. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
7. Fay C.M. Geisler, Nadja Vennewald, Thomas Kubiak, and Hannelore Weber. 2010. The impact of heart rate variability on subjective well-being is mediated by emotion regulation. *Personality and Individual Differences* 49, 7: 723–728. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2010.06.015>

8. John F. Golding. 2006. Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Personality and Individual Differences* 41, 2: 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2006.01.012>
9. David S. Goldstein, Oladi Benthoo, Mee-Yeong Park, and Yehonatan Sharabi. 2011. Low-frequency power of heart rate variability is not a measure of cardiac sympathetic tone but may be a measure of modulation of cardiac autonomic outflows by baroreflexes. *Experimental Physiology* 96, 12: 1255–1261. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2010.056259>
10. J.P. Gownder, J.L. McQuivey, and Carrie Johnson. 2016. The Coming Wave Of Virtual Reality. Retrieved from <https://www.forrester.com/report/The+Coming+Wave+Of+Virtual+Reality/-/E-RES133941>
11. Pallavi Halarnkar, Sahil Shah, Harsh Shah, Hardik Shah, and Anuj Shah. 2012. A Review on Virtual Reality. *International Journal of Computer Science Issues* 9, 6: 325–330.
12. Cédric Hufnagel, Patrick Chambres, and Catherine Auxiette. 2014. Les systèmes de monitoring du bien-être : application à l ’ anxiété dans les troubles du spectre autistique. *le Bulletin scientifique de l’arapi* 34: 50–55.
13. J. De Jonckheere, D. Rommel, JI Nandrino, M. Jeanne, and R. Logier. 2012. Heart rate variability analysis as an index of emotion regulation processes: Interest of the Analgesia Nociception Index (ANI). *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*: 3432–3435. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2012.6346703>
14. W. T. Lo and Richard H Y So. 2001. Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes. *Applied Ergonomics* 32, 1: 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(00\)00059-4](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(00)00059-4)

15. Horea Pauna, Pierre-majorique Léger, Sylvain Sénécal, and Marc Fredette. The Psychophysiological Effect of a Vibro-Kinetic Movie Experience : The Case of the D-BOX Movie Seat. 1–7.
16. Lisa Renee Rebenitsch. 2015. Cybersickness Prioritization and Modeling.
17. Giuseppe Riva, Fabrizia Mantovani, Claret Samantha Capideville, Alessandra Preziosa, Francesca Morganti, Daniela Villani, Andrea Gaggioli, Cristina Botella, and Mariano Alcañiz. 2007. Affective Interactions Using Virtual Reality: The Link between Presence and Emotions. *CyberPsychology & Behavior* 10, 1: 45–56. <https://doi.org/10.1089/cpb.2006.9993>
18. Suzanne C. Segerstrom and Lise Solberg Nes. 2007. Heart Rate Variability Reflects Effort, Strength, and Fatigue. *Psychological Science* 18, 3: 275–281. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01888.x>
19. Davis Simon, Nesbitt Keith, and Nalivaiko Eugene. 2014. A systematic review of Cybersickness. *British Journal of Health Psychology* 19: 149–180. <https://doi.org/10.1145/2677758.2677780>
20. Mel Slater, A Steed, J McCarthy, and F Maringelli. 1998. The influence of body movement on subjective presence in virtual environments. *Human Factors* 40, 3: 469–477. <https://doi.org/10.1518/001872098779591368>
21. Mario Vaderrama, Vincent Navarro, and Michel Le van Quyen. 2010. Heart Rate Variability as measurement of heart-brain interaction.pdf. *Epilepsie et coeur* 22, 3: 194–200. <https://doi.org/10.1684/epi.2010.0323>
22. Valentijn T. Visch, Ed S. Tan, and Dylan Molenaar. 2010. The emotional and cognitive effect of immersion in film viewing. *Cognition & Emotion* 24, 8: 1439–1445. <https://doi.org/10.1080/02699930903498186>
23. Brenda K. Wiederhold, Dong P Jang, Mayumi Kaneda, Cabral Irene, Yair Lurie, Todd May, In Y. Kim, Wiederhold Mark D., and Sun I. Kim. 2001. An investigation into

physiological responses in virtual environments: an objective measurement of presence.
{...} : Mind, cognitions and {...}: 175–184. <https://doi.org/10.1109/SAI.2015.7237225>

Chapitre 2: Article accepté à EuroHaptics 2018

Virtual Reality: Impact of Vibro-Kinetic Technology on Immersion and Psychophysiological State in Passive Seated Vehicular Movement

Alexandre Gardé, Pierre-Majorique Léger, Sylvain Sénécal, Marc Fredette, Shang-Lin Chen, Élise Labonté-Lemoyne et Jean-François Ménard

1. Abstract

In this paper, we investigate the effect of a vibro-kinetic seat, i.e., a seat using movement and vibration synchronized with a given media, on psychophysiological states and head movements of users immersed in virtual reality. The aim of this study is to explore the extent to which a vibro-kinetic seat can contribute to create a more immersive virtual reality experience than with a classic seat, including fewer cybersickness discomfort symptoms. We test our hypothesis with a between-subject design where we assigned 45 participants to a specific condition: Vibro-kinetic condition (with the seat moving according to the virtual reality experience) or non-vibro-kinetic condition (where the seat was motionless). Users' physiological states were captured using electrodermal activity and heart rate variability. Users' head movements were captured using automatic video detection. The results suggest that the vibro-kinetic condition leads to more immersion and better psychophysiological state to live a more optimal virtual reality experience without cybersickness symptoms. Also, based on the head movement detection, the vibro-kinetic seat seems to contribute to increasing head movements for a large number of users, an indication of the increased presence feeling in virtual reality. Moreover, users in the vibro-kinetic condition live an enhanced experience and are more immersed in the VR experience.

Keywords: Vibro-kinetic, virtual reality, cybersickness, motion sickness, psychophysiological, movement, immersion, parasympathetic, haptic feedback, Oculus rift, ECG, HRV, HF, EDA, SCR.

2. Introduction

This paper investigates the effect of vibro-kinetic (VK) technology on a user's psychophysiological states in a virtual reality (VR) context, specifically in the context of a head mounted device (HMD). We investigate the impact of a VK seat, i.e., a seat using movement and vibration synchronized with a given media, on the immersive VR experience of the user. We explore the extent to which VK can augment the experience emotionally and physiologically, while helping to reduce negative side effects such as cybersickness.

VK technologies are relatively new technologies that can manage a specific type of media channel called motion code. This code is used to produce motion and vibration synchronized with a given media. Indeed, VK technology can be defined as artifacts providing whole-body motion and vibration feedback (frequency response between 0 and 100 Hz) adjusted with the media scenes. The aim of this artifact is to actively produce feedback to reinforce the audiovisual input from the media. It can induce a physical feedback such as the feeling of driving on a bumpy road or the feeling of a strong impact during a car crash. In this study, the seat used generates multiple vibrations and trembling motions according to what the user sees in the virtual world. In the case of a rollercoaster stimuli, if the user goes up, the VK seat induces the feeling of a wagon that is going up the slope, trembling in contact with the rails.

VR, also called virtual environment (VE), is a three-dimensional computer-generated simulation [21]. VR technology aims at creating a digital world inspired by human imagination or recreated from reality that can be immersive, interactive, and multisensory [9].

Immersion can be defined as the experience of being surrounded by a completely different reality, of being transported to an elaborately simulated place [6, 12, 19, 23]. Other authors also affirm that immersion is about sensory fidelity, i.e., sensory cues similar to those experienced in the real world [5].

According to Witmer & Singer [36], when immersion is optimal, users experience a high feeling of presence. Presence is defined as the natural recognition of an environment [23] and the conscious feeling on the part of the viewer of being in a virtual world, caused by unconscious spatial perception processes [29]. If the VR experience does not induce a sense of presence, the experience is also likely to be less emotionally strong [28]. Few researchers studied immersion and gender, but some suggest that there is a possible difference between women and men when it comes to feelings of presence [2].

Cybersickness is also an important factor in the VR user experience. Cybersickness is a well-known issue in VR and VE experiences [17]. Cybersickness, also called VR sickness, occurs only in VE contexts [31]. To our knowledge, VK technology has not been tested to measure its impact on cybersickness [26]. This form of motion sickness generally results in felling symptoms such as nausea, headache, or simply by a feeling of general discomfort [1]. Research suggests that cybersickness could be linked with feelings of presence. In fact, there is an inverse relation between cybersickness and sense of presence [7, 36]. According to Bles and al.[4] and their work on motion sickness and rearrangement theory [26], cybersickness; and more generally all types of motion sickness, find their origin in the conflict about subjective vertical (SV), i.e., the internal representation of gravity [4]. Rearrangement theory is the main motions sickness theory in the research and is widely accepted. Basically, it states that motion sickness is due to a mismatch between signals transmitted by the eyes, the vestibular system and the nonvestibular proprioceptors to the brain [25], 1978). Bles and al. [4] simplify this main theory with their so-called SV-conflict theory. SV-conflict theory demonstrated that most of motion sickness experimental data can be explained by the conflict regarding the subjective vertical. It's defined as "all situations which provoke motion sickness are characterized by a condition in which the sensed vertical as determined on the basis of integrated information from the eyes, the vestibular system and the nonvestibular proprioceptors is at variance with the subjective vertical as predicted on the basis of previous experience." [4, p 481-482].

H1: Building on this literature, previous studies have shown that the VK experience can significantly enhance the emotional experience and generate greater arousal [24]. In line with Slater & Wilbur [33], we hypothesize that the VK condition (when the seat is moving according to the VR stimuli) enhances the immersion (H1). Immersion is positively correlated with the increase in emotion intensity [35] which can be seen through EDA data. EDA refers to the change in the electrical properties of the skin in response to sweat secretion by the eccrine sweat glands [10] influenced by the activity of the sympathetic nervous system (SNS). The physiological basis of EDA is an involuntary reaction that occurs in the skin and subcutaneous tissue in response to changes in emotions. Thus, we expect a significant difference in terms of electrodermal activity (EDA) between VR experienced with or without a VK seat.

H2: Moreover, research suggests that a person who moves his head during VR would feel a stronger sense of presence during his immersion [32]. VR is a 360° world, inviting users to look all around, above and below them. If the users feel really present in the VE, they will look everywhere and not only right in front of them like in a cinema context. We hypothesize that the VK condition should lead to more significant head movement during the experience, a proxy of their sense of presence (H2). Based on SV-conflict theory, head movement should be particularly significant on the x and z-axis, y-axis being not concerned by SV.

H3: We argue that a VK seat can contribute to a psychophysiological state that is likely to help to maintain users in an optimal immersive experience. Subjects shouldn't have to make continuous autoregulation efforts to reach or stay in this homeostatic state and be relaxed. To monitor this state, we watched the influence of the autonomic nervous system (ANS) on the HRV. The parasympathetic nervous system (PNS), one of the two parts of the ANS, induces a relaxation response in the body which decreases blood pressure, slows respiratory activity and heart rate to help one reach a homeostatic state [3]. When someone is taking control of his diaphragmatic breathing to calm down, he/she tries to regulate himself consciously. This conscious autoregulation increases heart rate variability and lowers heart rate [8]. Strong correlation between HF and respiration have been shown in the literature [16, 34]. HF reflects respiration [16] and positively impacts the PNS [20].

We hypothesize that the VK condition should lead to a more optimal state that requires less conscious autoregulation (H3).

3. Method

3.1 Sample and Design

We conducted a between-subject experiment in which 45 participants were either assigned to a VK condition with the seat moving according to the VR experience, or a non-VK condition where the seat was motionless like a classic seat. This experiment was approved by the IRB of our institution.

Participants' gender and susceptibility to motion sickness were taken into consideration when assigned to conditions. Our objective was to ensure that conditions were well balanced according to these two variables since motion sickness is an important issue when it comes to VR [17]. To recruit subjects with a large range of motion sickness susceptibility, we use the Motion Sickness Susceptibility Questionnaire (MSSQ) [15]. In this questionnaire, respondents have to rate their past experience in different types of vehicles (boat, aircraft, cars, swings in playgrounds, etc). The final score is between 0, with no experience of motion sickness at all; to 54, when the maximum score in all kind of vehicle (average = 10.54; SD = 9.39). Furthermore, to reduce potential biases related to recent VR experiences, participants must have had no VR usage in the last 30 days and should be able to use VR head-mounted device without glasses.

The final sample was composed of 24 males and 22 females with an average age of 24-year-old (4.9 standard deviations). Twenty-four (24) participants (12 females) were assigned to the VK condition and 22 (10 females) to the non-VK condition. In addition, no significant difference was found in the MSSQ scores of the two groups (p -value >0.05). Each participant received a \$30 compensation for their participation.

3.2 Procedure and Stimuli

For the experiment, participants were seated during a 10-minute VR stimulus in which they experience a passive vehicular movement with a VR headset (Fig.1).



Fig. 1. Experimental montage

A D-Box (Longueuil, Canada) VK seat specifically designed for VR was used. It was only activated for participants in VK condition. Its movements were designed by specialized movement artists in order to enhance the VR stimulus. For both conditions, we used an Oculus Rift Cv1 (Menlo Park, CA) headset. A pretest was conducted (n=7) to ensure that participants clearly understood the instructions and to address technical issues.

We designed a stimulus which was composed of three short Passive Seated Vehicular Movement VR experiences where users did not have to and could not interact with the Virtual Environment (VE). They only have to sit, look around and enjoy the stimuli. These VR experiences were seen consecutively to make a global 10 minute experience. The aim of this was to build a stimulus that was more and more susceptible to induce motion sickness. Seven pretests were done to validate the final stimuli. The stimuli presented to the participants were composed with 1) two laps as a co-pilot in a race car, 2) a roller coaster ride, and 3) a cartoon snow ride. All participants experienced the stimuli in this order. During the stimuli, participants saw the scene from the point of view of a passenger in car or wagon, depending on the moment of the stimuli.

We placed the participants with the physiological sensors in the D-box seat. We performed a baseline measurement of 1 minute and 30 seconds for stabilizing the physiological equipment before the experiment. Participants were given instructions to

take off the Oculus Rift if they felt uncomfortable due to cybersickness symptoms, at which point we would stop the experiment. We also specified that stopping the experiment would not impact their compensation, and that it was all part of the experience. Following the instructions, we helped them to correctly put the Oculus Rift on their head and we launched the stimuli. Fifteen participants interrupted the experience before the end of the stimuli (no difference between VK and non-VK conditions, p -value = 0.596). On average, participants saw 90.0% of the VR stimuli (no difference between conditions, p -value = 0.503).

3.3 Instruments and Measures

To track head movements, we used Facereader (Wageningen, Netherlands), an automatic video analysis software. This software has a robust head orientation tracking system [22] and can give the position of the head in degree between -45° and $+45^\circ$ (0 on each axis when the face is perfectly right). This angle is measured simultaneously around the 3 axes: x, y and z. In other words, when subjects say “no” with their heads, we see data points changing on the x-axis. When they say “yes” with their heads, we see data points changing on the y-axis. And when they are tilting their heads like clockwise, we see data points changing on the z-axis.

In order to measure the psychophysiological state, we use electrodermal activity (EDA) and electrocardiography (ECG). More specifically, we focus on skin conductance response (SCR), which corresponds to the physical change of electrical conductivity of the skin, to measure the activity of the Sympathetic nervous system (SNS) and the high frequencies (HF) of the heart rate variability (HRV) to measure the activity of the Parasympathetic nervous system (PNS). SNS and PNS are both parts of the autonomic nervous system (ANS) and have different influences on the body. The activation of the SNS prepares an individual's body for action. In response to stress, it orchestrates a "fight or flight" response, which leads to some phenomenon like a dilation of the bronchi, an acceleration of cardiac and respiratory activity, an increase in blood pressure, etc [3]. The activation of the PNS, or vagal system, corresponds to a relaxation response. When activated, functions of the organism will generally slowdown. Heart rate gets slower as

well as the respiratory activity [3]. HF are generated by the heart and can be seen between 0.15 and 0.4 Hz [13, 18].

HF is presenting as a self-regulation index [30] and is considered a proxy of regulatory strength i.e., the ability to exert self-control and to override or alter one's dominant response tendencies [14]. Thus, in our experimental design, an HF increase is linked to the participants attempting to self-regulate by focusing on their breathing and taking deeper breaths to avoid any sickness feeling. SCR and HRV were captured using Biopac wireless sensors (Goleta, USA). Noldus Observer XT (Wageningen, Netherlands) was used to synchronize the presentation of the experimental stimuli with the D-BOX Cinemotion player (Longueuil, Canada). Biopac Acknowledge (Goleta, USA) was used to analyze EDA and ECG data.

4. Analysis

Concerning head movement, a logistic regression was performed to model the effect of z-axis head movement on the probability of stopping the experiment before its end, as the response variable is binary (quit or not). The number of observations $N=15$. Moreover, for men older than 23 years old (15 males out of 24) a Wilcoxon Sum Rank test was performed to compare the head movement on z-axis between participants in VK and non-VK condition, given the between-subject design of the experiment and the small number of participants in each group ($N=8$ in VK condition, $N=7$ in non-VK condition).

To compare psychophysiological states of participants in VK and non-VK conditions, we use the means of physiological measurements between the two groups. Heteroskedastic Student tests with unequal variances were performed. In our experimental design, we asked participants to get off the HMD if they were feeling any discomfort. For this reason, we analyzed two times periods: the last minute of the participant's experience and the whole experience.

5. Results

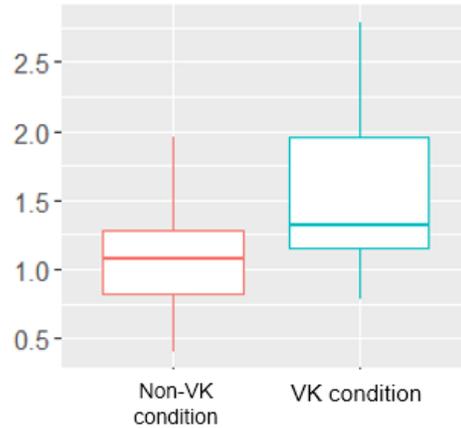


Fig. 2. Augmentation in the SCR rate during the experiment

H1: Fig.2 shows the augmentation in SCR apparition rate during the whole experience normalized with the baseline. Results show that VK condition lead to more activation compare to the group in non-VK condition (p-value = 0.0029). Subject's group in VK condition know 44.7% more SCR, with a 95% confidence interval ranging from 30.5% to 59.0%. Residue analysis reveals damaged signal and outlier data. Four participants (3 in VK condition) had to be removed from this ANOVA analysis. Better immersions being linked to higher SCR, this results support vigorously H1: VK seat pushes the immersion further.

H2: When users are more immersed in VR, they tend to move their head more on the z-axis to stay perfectly aligned with the visual. Then, we hypothesize that participants in VK condition should have more head movement around the z-axis. Results of head movements give us interesting patterns for male older than 23 years old (15 men on 24 of our sample) on this axis. We found that VK condition induces more head movement on the z-axis for this kind of users (p-value = 0.054). Moreover, in our sample, head movements around z are linked to a lower probability to stop the VR experience before the end of the stimuli (p-value = 0.073). These results support partially our H2 which says that VK condition should enhance the movement of the head in a more natural way that translates a better feeling of presence of participants.

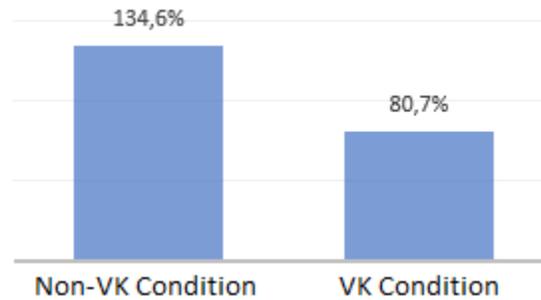


Fig. 3. HF ratio in non-VK and VK condition during last minute

H3: Here, we hypothesize that VK seat contributes to better psychophysiological states for an optimal VR experience that is defined by a less conscious autoregulation and so less activation of the parasympathetic nervous system (PNS). Our results support this hypothesis. We compare participants of the two conditions in terms of HF ratio from their HRV. This ratio represents the HF average for the last minute of the stimuli experienced by the user divided by the HF average of the rest of the experience. A significant difference was found between the HF of the VK group and the non-VK group (p -value = 0.040). HF increased by 134,6% in the non-VK condition compared to only 80,7 % in the VK condition in the last minute of the VR experience (Fig.3). This result supports our H3 and clearly demonstrates that VK seat helps users to have a better autoregulation.

6. Discussion and Conclusion

This study investigated the influence of vibro-kinetic (VK) technology on immersion in the context of a passive seated vehicular shifting in virtual reality (VR). We conducted a between-subject experiment in which we used a 10 min stimulus to immerse 45 subjects. Results of the analysis of psychophysiological data and head tracking support that VK contributes to induce a more immersive VR experience for the users. Our results contribute to the literature by filling a gap on the effect of VK seats in a passive VR experiment.

VR is all about bringing the users into another world. The users must feel physically there, in this recreated world, as if it were real. If the users aren't totally immersed, if they don't

feel present in the virtual world, then their experience will be less emotionally strong [28]. We find that the seat that we used in this experiment, i.e., a seat moving in accordance with the VR scene, enhanced the emotions that the user was experiencing, pushing further his/her immersion in the virtual environment (VE).

Analysis of head movements reinforces findings about immersion. In our experimental design, no specific instructions were given to participants with regards to head movement in the virtual scene. A large part of male participants naturally aligned their heads on the z-axis. This axis is the one where results are the most meaningful when it comes to cybersickness [27]. According to the subjective vertical (SV)-conflict theory [4], cybersickness is due to a conflict regarding the SV i.e., the internal representation of gravity. This theory states that motion sickness is due to a mismatch between SV, determined by previous experiences; and the sensed vertical, predicted on the basis of information sent from the eyes, the vestibular system and the nonvestibular proprioceptors. If we interpret this theory with a 3D point of view, it could suggest that conflict appears with changes on the x-axis and the z-axis (the y-axis being the only one that didn't change the aspect of SV). Our head movement results support Bles and al. work [4]. Based on the SV-conflict theory, in the case of vehicular movement in VR, when participants align their head around the z-axis, it could mean that the user feels like moving with the virtual car. In real life conditions, when we are in a vehicle, it is natural to see people leaning during a turn or a curve. This is the phenomenon that we observed for 62.5% of our male sample. So, the VK condition appears to help users move as they would in real life conditions. Thus we can say that the VK condition leads to a more natural movement of the head in the context of vehicular movement in VR.

Moreover, results show an interesting pattern concerning ECG analysis for cybersickness literature. It is pertinent to investigate the effect of VK technology on the brain considering that motion sickness symptoms are psychophysiological. The brain's nervous system includes two parts that work simultaneously: the autonomic nervous system (ANS) and the parasympathetic nervous system (PNS). We observed the reaction of the PNS using high frequencies (HF) of the heart, HF being an index of PNS [18, 37]. PNS governs the resting and rehabilitation of the body. When activated, the brain aims to return

to its homeostatic state contrary to the stress response that is induced by ANS, also called "fight or flight" reaction [3]. During our analysis, we focused on the whole experience and on the last minute of each participant. The last minute is important in our experimental design because the participants were free to stop the experience when they started to feel any discomfort due to cybersickness. The last minute tells us what the psychophysiological state of the participant was just before ending the VR immersion. We find an augmentation of HF during the last minute for subjects with a still seat (non-VK condition). HF is a synonym of PNS activation and is a proxy of respiration [16, 20, 34]. It means that, when subjects are seated on a normal chair, they need to regulate themselves using deep breaths in order to calm their body and decrease discomfort. Based on this, VK technology could help VR users to autoregulate and stay in a relaxed state leading to fewer symptoms of cybersickness. This study provides encouraging results for future research in this area.

To better understand how VK technology impacts cybersickness, future studies should use longer stimuli. It is well known in the literature that the probability of cybersickness highly increases over time [11]. Furthermore, our study was conducted with a passive VR stimuli. Interactive VR stimuli should be tested as well to determine if our results can be extended to other types of VR experiments.

In summary, results show that VK contributes to the VR experience by pushing the immersion further, inducing a better psychophysiological state that is more optimal for VR experience and by fostering more natural head movements for a large number of users, leading to a higher sense of presence in the VR. This study also illustrates that VK technology is an opportunity for the VR industry to reduce cybersickness, a major issue when it comes to VR experiences.

7. References

1. Abrams C, Earl WK, Baker CH, Buckner DN (1971) Studies of the effects of sea motion on human performance. Off Nav Res Pechnical Rep 791–796

2. Annetta L, Klesath M, John M (2009) Taking Science Online: Evaluating Presence and Immersion Through a Laboratory Experience in a Virtual Learning Environment for Entomology Students. 27–34
3. Bear MF, Connors BW (2016) Neurosciences (4e édition): À la découverte du cerveau
4. Bles W, Bos JE, De Graaf B, Groen E, Wertheim AH (1998) Motion sickness: Only one provocative conflict? *Brain Res Bull* 47:481–487. doi: 10.1016/S0361-9230(98)00115-4
5. Bowman D a, McMahan RP, Tech V (2007) Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? (Cover story). *Computer (Long Beach Calif)* 40:36–43. doi: 10.1109/MC.2007.257
6. Brown E, Cairns P (2004) A grounded investigation of game immersion. *Ext Abstr 2004 Conf Hum factors Comput Syst - CHI '04* 1297. doi: 10.1145/985921.986048
7. Busscher B, de Vliegher D, Ling Y, Brinkman WP (2011) Physiological measures and self-report to evaluate neutral virtual reality worlds. *J Cyber Ther Rehabil* 4:15–25
8. Cottin F, Médigue C, Papelier Y (2008) Effect of heavy exercise on spectral baroreflex sensitivity, heart rate, and blood pressure variability in well-trained humans. *Am J Physiol - Hear Circ Physiol* 295:H1150–H1155. doi: 10.1152/ajpheart.00003.2008
9. Cruz-Neira C (1993) Virtual reality overview. In: SIGGRAPH. p 1
10. Dawson ME, Schell AM, Fillion DL (2000) The electrodermal system. *Handb. Psychophysiol.* 200–223
11. Drexler JM (2006) Identification of system design features that affect sickness in virtual environments. ProQuest Diss Theses n/a

12. Ermi L, Mäyrä F (2005) Fundamental Components of the Gameplay Experience: Analysing Immersion. *Chang Views Worlds Play* 15–27. doi: 10.1080/10641260490479818
13. Gacek A (2015) ECG signal processing, classification and interpretation
14. Geisler FCM, Vennwald N, Kubiak T, Weber H (2010) The impact of heart rate variability on subjective well-being is mediated by emotion regulation. *Pers Individ Dif* 49:723–728. doi: 10.1016/j.paid.2010.06.015
15. Golding JF (2006) Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Pers Individ Dif* 41:237–248. doi: 10.1016/j.paid.2006.01.012
16. Goldstein DS, Benth O, Park M-Y, Sharabi Y (2011) Low-frequency power of heart rate variability is not a measure of cardiac sympathetic tone but may be a measure of modulation of cardiac autonomic outflows by baroreflexes. *Exp Physiol* 96:1255–1261. doi: 10.1113/expphysiol.2010.056259
17. Gownder JP, McQuivey JL, Johnson C (2016) The Coming Wave Of Virtual Reality
18. Hufnagel C, Chambres P, Auxiette C (2014) Les systèmes de monitoring du bien-être : application à l' anxiété dans les troubles du spectre autistique. *le Bull Sci l'arapi* 34:50–55
19. Jennett C, Cox AL, Cairns P, Dhoparee S, Epps A, Tijis T, Walton A (2008) Measuring and defining the experience of immersion in games. *Int J Hum Comput Stud* 66:641–661. doi: 10.1016/j.ijhcs.2008.04.004
20. De Jonckheere J, Rommel D, Nandrino J, Jeanne M, Logier R (2012) Heart rate variability analysis as an index of emotion regulation processes: Interest of the Analgesia Nociception Index (ANI). *Proc Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc EMBS* 3432–3435. doi: 10.1109/EMBC.2012.6346703

21. Kolasinski E (1996) Prediction of simulator sickness in a virtual environment
22. Kuilenburg H Van, Uyl MJ Den, Israël ML, Ivan P (2008) Advances in face and gesture analysis. *Proc Meas Behav* 371–372
23. McMahan a (2003) Immersion, Engagement, and Presence. video game theory Read Immersion, :67–86
24. Pauna H, Léger P, Sénécal S, Fredette M, Courtemanche F, Chen S-L, L.LeMoyne E, Ménard J-F (2018) The Psychophysiological Effect of a Vibro-Kinetic Movie Experience: The Case of the D-BOX Movie Seat. In: *Information Systems and Neuroscience*. Springer, Berlin, pp 1–7
25. Reason JT (1978) Motion sickness adaptation: a neural mismatch model. *J R Soc Med* 71:819–29. doi: 10.1177/014107687807101109
26. Reason JT, Brand JJ (1975) Motion sickness. Academic press
27. Rebenitsch LR (2015) Cybersickness Prioritization and Modeling. Michigan State University
28. Riva G, Mantovani F, Capideville CS, Preziosa A, Morganti F, Villani D, Gaggioli A, Botella C, Alcañiz M (2007) Affective Interactions Using Virtual Reality: The Link between Presence and Emotions. *CyberPsychology Behav* 10:45–56. doi: 10.1089/cpb.2006.9993
29. Schubert TW (2009) A new conception of spatial presence: Once again, with feeling. *Commun Theory* 19:161–187. doi: 10.1111/j.1468-2885.2009.01340.x
30. Segerstrom SC, Nes LS (2007) Heart Rate Variability Reflects Effort, Strength, and Fatigue. *Psychol Sci* 18:275–281. doi: 10.1111/j.1467-9280.2007.01888.x
31. Simon D, Keith N, Eugene N (2014) A systematic review of Cybersickness. *Br J Health Psychol* 19:149–180. doi: 10.1145/2677758.2677780

32. Slater M, Steed A, McCarthy J, Maringelli F (1998) The influence of body movement on subjective presence in virtual environments. *Hum Factors* 40:469–477. doi: 10.1518/001872098779591368
33. Slater M, Wilbur S (1997) A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 6:603–616. doi: 10.1007/s10750-008-9541-7
34. Vaderrama M, Navarro V, Le van Quyen M (2010) Heart Rate Variability as measurement of heart-brain interaction.pdf. *Epilepsie et coeur* 22:194–200. doi: 10.1684/epi.2010.0323
35. Visch VT, Tan ES, Molenaar D (2010) The emotional and cognitive effect of immersion in film viewing. *Cogn Emot* 24:1439–1445. doi: 10.1080/02699930903498186
36. Witmer BG, Singer MJ (1998) Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 7:225–240. doi: 10.1162/105474698565686
37. Wu W, Lee J (2009) Improvement of HRV methodology for positive/negative emotion assessment. *Proc 5th Int ICST Conf Collab Comput Networking, Appl Work.* doi: 10.4108/ICST.COLLABORATECOM2009.8296

Conclusion

8. Sommaire

Le résultat principal de notre étude menée auprès de 45 participants (22 femmes et 23 hommes entre 20 et 45 ans) atteste que, dans le cas de déplacement passif en position assise, un fauteuil vibro-cinétique synchronisé avec le média aide les utilisateurs à vivre une meilleure expérience de réalité virtuelle. Plus précisément, ce genre de technologie a un impact psychophysiologique sur l'individu : il vit des émotions plus intenses et se trouve dans un état physiologique lui permettant de rester plus longtemps dans l'expérience.

Dans le premier article, nous nous sommes focalisés sur l'identification de cet état; soit la différence d'état physiologique entre ceux qui finissaient l'expérience et ceux qui la quittaient avant la fin en raison d'un sentiment d'inconfort. Ainsi, nous avons pu constater que les hautes fréquences (HF) cardiaques jouent un rôle primordial dans ce sentiment d'inconfort. Dans notre étude, l'augmentation des HF va de pair avec le besoin de quitter l'expérience et nous constatons que cette augmentation est bien supérieure chez les personnes ayant vécu l'expérience sans le fauteuil en mouvement (Condition non-vibro-cinétique).

Dans le deuxième article, nous nous sommes intéressés aux notions d'immersion et de sentiment de présence en contexte d'expérience de RV. En effet, la littérature sur le sujet atteste que plus une expérience est immersive, plus l'expérience vécue par l'utilisateur est positive. Le sentiment de présence est directement lié à la qualité de l'immersion et fait référence au sentiment subjectif, à l'illusion, qu'a un individu de se trouver physiquement présent dans un milieu, dans notre cas, dans l'expérience de RV. Nous avons trouvé ici que les participants ayant vécu l'expérience avec le fauteuil en mouvement (condition vibro-cinétique) étaient plus immergés dans la RV et montraient des signes de présence plus forts. Pour y parvenir, nous avons ajouté l'analyse des mouvements de la tête à notre étude. Le résultat ici est qu'une large partie de nos participants en condition VK regardent

plus naturellement autour d'eux, profitant ainsi pleinement des possibilités offertes par le casque de RV au lieu de simplement regarder devant eux comme sur un écran de cinéma.

9. Rappel des questions de recherches

Q1 : Le mouvement vibro-cinétique contribue-t-il à améliorer l'expérience utilisateur immergé en RV?

Oui, nos résultats suggèrent que le mouvement du siège rehausse l'expérience utilisateur en RV. Spécifiquement, les participants en condition mouvement présentent une activation physiologique (EDA) significativement plus importante durant l'expérience. En d'autres termes, la réaction physiologique des participants en contexte vibro-cinétique est rehaussée ; ils vivent l'expérience VR plus intensément.

Q2 : Le mouvement vibro-cinétique contribue-t-il à générer un état vécu propice au contexte de la RV?

Oui, le mouvement du siège semble contribuer à créer un état psychophysiologique plus propice au contexte la réalité virtuelle. En effet, l'augmentation dans la dernière minute de l'expérience des HF chez les participants sans mouvement suggère que ceux-ci doivent consciemment se calmer ou tenter de contrôler leur respiration ; le mouvement semble aider les participants à s'autoréguler sans effort conscient.

Q3 : Le mouvement vibro-cinétique contribue-t-il à mieux immerger ses utilisateurs et à augmenter leur sentiment de présence?

Oui, les mouvements favorisent une meilleure immersion et un plus fort sentiment de présence. Une large portion des participants en condition mouvement bougeaient davantage la tête, regardant plus autour d'eux, profitant ainsi davantage des capacités de la RV. Il est intéressant de noter que nous n'avons aucunement incité oralement les participants à regarder autour d'eux, mais qu'ils l'ont fait d'eux-mêmes, spontanément, lorsqu'ils étaient en condition avec mouvement, traduisant ainsi une immersion plus forte.

10. Contributions théoriques

Comme Rebenitsch (2015) l'a relevé, les retours haptiques (comme ceux induits par le fauteuil D-BOX que nous avons utilisé) n'avaient pas été testés dans un contexte de RV et dans le but d'étudier le mal de la RV. Cette étude contribue donc à combler ce vide en étudiant le cas d'expérience virtuelle dans lequel l'utilisateur se trouve en position assise et n'a pas à interagir directement avec l'environnement virtuel.

Introduire des retours haptiques dans une expérience de réalité virtuelle n'est pas une nouveauté. Certains auteurs (Mazuryk & Gervautz, 1996) définissent même un système immersif qui utilise des retours haptiques couplés à un stimulus auditif amélioré comme l'ultime version d'un système de RV. En effet, les retours haptiques comme le mouvement ont classiquement été testés dans le cas de simulateurs (Kennedy et al., 1987; Plouzeau, 2017; Sharkey & McCauley, 1992) mais peu dans le cadre de RV. Cette technologie est encore onéreuse et peu accessible, ce qui ne favorise pas le développement de travaux de recherches sur le sujet. D'autres études ont choisi d'étudier le mal de la RV par d'autres axes. Certains chercheurs ont approfondi la piste du sentiment de présence et de son lien avec le mal de la RV. Cela a permis d'établir un lien positif entre le fait de se sentir présent dans l'environnement virtuel et de ressentir moins de symptômes liés au mal de la RV (Busscher, de Vliegher, Ling, & Brinkman, 2011; Nichols, CHaldane, & Wilson, 2000; Witmer & Singer, 1998). D'autres chercheurs se sont limités à surveiller le système nerveux et ses variations et ont trouvé un lien entre activations du système nerveux parasympathique et l'apparition de symptômes (Russell, Hoffman, Stromberg, & Carlson, 2014). Notre travail complète la littérature en y ajoutant la notion de mouvement. En somme, nous étudions l'impact de mouvement sur le cerveau, ce qui fait sens considérant que les symptômes de mal de la RV sont psychophysiologiques.

11. Implication pour l'industrie

L'apport de cette étude pour l'industrie a l'avantage d'être concret car nous avons utilisé des stimuli et une technologie qui est actuellement disponible sur le marché. Nos participants ont donc vécu une expérience dans un environnement écologiquement valide. L'industrie peut donc en tirer des conclusions immédiates et les appliquer à sa propre

stratégie de développement. Lorsque l'on sait que le mal de la RV est le plus gros frein à l'adoption de cette technologie par le grand public (Fernandes & Feiner, 2016), on mesure rapidement les enjeux qui découlent du fait de trouver une solution à ce mal. Notre étude démontre qu'une solution existe et qu'elle se situe dans ce que vit l'individu. Les développeurs de contenu VR ont, grâce à notre étude, de nouvelles pistes pour développer et améliorer leur production. Pour une partie de ces développeurs, cela montre l'importance de proposer une expérience de RV globale, allant au-delà de l'image et du son, pour pousser l'immersion et le sentiment de présence toujours plus loin.

12. Limites et futures recherches

Par ses résultats positifs, cette étude est un argument en faveur de futures recherches dans l'étude de l'influence des mouvements imposés à l'utilisateur en contexte de RV. Étudier les retours haptiques dans d'autres contextes qu'une expérience passive en position assise est nécessaire pour combler le vide actuel de la recherche sur le mal de la RV et les retours haptiques. Aussi, nous avons utilisé des stimuli disponibles sur le marché et qui permettaient d'immerger 10 min nos participants en RV. Pour être en mesure de dire s'il existe un lien direct entre l'influence des mouvements et la puissance des symptômes du mal de la RV, un stimulus plus long doit être testé. Si l'on se fonde sur la littérature (Kennedy, Stanney, & Dunlap, 2000; Rebenitsch, 2015), un stimulus de 20 min devrait permettre d'obtenir des résultats valides.

Fort des connaissances acquises tout au long de ce projet de recherche, si nous devions reproduire l'expérience avec le même fauteuil dans le but de mesurer son incidence sur le mal de la RV, nous adapterions différents points. Nous utiliserions un stimulus unique, non composé de plusieurs stimuli, d'une durée de 20-25 min. Ainsi, nous pourrions mesurer clairement si les mouvements permettent aux participants de rester plus longtemps dans l'expérience. De plus, utiliser un seul stimulus permet d'éviter de resynchroniser les stimuli avec les données psychophysiologiques pour chaque participant, ce qui simplifie grandement le travail de préanalyse. Concernant le recrutement, nous pourrions demander aux participants s'ils ont des phobies, comme le vertige, pour pouvoir mener les analyses en fonction de leur(s) phobie(s). Ainsi, nous serions en mesure de voir la RV aide les participants phobiques à surpasser leur peur ou

encore quelles sont les différences en fonction des conditions mouvement/sans mouvement. Il semble que dans certains cas de phobie, la qualité des retours haptiques soit plus importante qu'un visuel réaliste (Brooks, 1999). Aussi, pour appuyer nos résultats concernant HF, nous pourrions mesurer directement la fréquence de respiration. On peut trouver dans la littérature un lien entre respiration et mal de la RV (Kim, Kim, Kim, Ko, & Kim, 2005; Patrao, Pedro, & Menezes, 2015; Rebenitsch, 2015). Ainsi, avec les données de la respiration couplées à l'ECG, nous pourrions établir la représentation des variations de la fréquence cardiaque qui accompagne l'inspiration et l'expiration. Cependant, il faut prêter une attention particulière au moment où la respiration varie. Si des changements dans la respiration arrivent au même moment pour une grande partie des participants, cela pourrait être lié au stimulus dans le cas d'une émotion induite par ce dernier (Davis, Nesbitt, & Nalivaiko, 2014). Enfin, après l'immersion, demander aux participants de remplir un questionnaire spécifique pour mesurer leur sentiment de présence et d'immersion dans le but de comparer leur état physiologique à leurs données rapportées sur ce sujet viendrait renforcer l'étude.

Enfin, ce travail de recherche met en exergue un fait primordial : une expérience de RV doit être pensée au-delà de ce qu'il se passe dans le casque de RV. Pour fournir, créer et inventer de nouvelles expériences ; les designers, les storytellers et les producteurs doivent prendre en compte ce que vit réellement l'utilisateur, au-delà de ce qu'il voit. Une bonne expérience de RV n'est pas celle qui aura le plus d'effet « wow ». C'est celle qui va réussir à immerger totalement son utilisateur, à le faire sentir présent dans ce monde (Meehan, Insko, Whitton, & Brooks Jr, 2002; Witmer & Singer, 1998). Plus l'expérience est longue, plus la personne immergée aura de chance de connaître le mal de la RV (Robert S Kennedy et al., 2000; Rebenitsch, 2015). Pour l'industrie, cela signifie que plus une expérience sera longue, plus la question de l'optimiser sera importante. Pour cela, les mouvements couplés à un environnement virtuel sont un artefact puissant pouvant pousser l'immersion de l'individu plus loin et donc lui permettre d'accéder à une expérience de RV plus optimale.

Bibliographie

Abrams, C., Earl, W. K., Baker, C. H., & Buckner, D. N. (1971). Studies of the effects of sea motion on human performance. *Office of Naval Research, Technical Report*, 791–796.

Agency Bradant Development. (2017). *Virtual reality and augmented reality. Hype? Or serious business?*

Allen, R. C., Singer, M. J., McDonald, D. P., & Cotton, J. E. (1997). AGE DIFFERENCES IN A VIRTUAL REALITY ENTERTAINMENT ENVIRONMENT: A FIELD STUDY, 1997–2000.

Audureau, W. (2015). Réalité virtuelle, réalité augmentée, holographie : quelles différences ? *Le Monde*. Retrieved from http://www.lemonde.fr/pixels/article/2015/01/22/realite-virtuelle-realite-augmentee-holographie-queelles-differences_4561606_4408996.html

Balk, S. A., Bertola, M. A., & Inman, V. W. (2013). Simulator sickness questionnaire: Twenty years later. *Proceedings of the Seventh International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design*, 257–263. <https://doi.org/http://trid.trb.org/view.aspx?id=1261648>

Bear, M. F., & Connors, B. W. (2016). *Neurosciences (4e édition): A la découverte du cerveau*.

Bles, W., Bos, J. E., De Graaf, B., Groen, E., & Wertheim, A. H. (1998). Motion sickness: Only one provocative conflict? *Brain Research Bulletin*, 47(5), 481–487. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00115-4](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00115-4)

Blouin, B. (2004). *Mécanisme de stabilisation de la tête sur le tronc en position assise*.

Bouchard, S., Robillard, G., & Renaud, P. (2007). *Revising the factor structure of the*

Simulator Sickness Questionnaire. Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine (Vol. 5). https://doi.org/10.1007/978-3-642-02806-9_12

Boucein, W. (2014). *Electrodermal Activity. Igarss 2014*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1126-0>

Bouyer, G. (2007). *Rendu multimodal en Réalité Virtuelle : Supervision des interactions au service de la tâche. Université Paris Sud - Paris XI*.

Brooks, F. P. (1999). What's Real About Virtual Reality? *Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316)*, (December), 2–3. <https://doi.org/10.1109/VR.1999.756916>

Bruck, S., & Watters, P. A. (2009). Estimating cybersickness of simulated motion using the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ): A controlled study. *Proceedings of the 2009 6th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization: New Advances and Trends, CGIV2009*, (June 2014), 486–488. <https://doi.org/10.1109/CGIV.2009.83>

Busscher, B., de Vlieghe, D., Ling, Y., & Brinkman, W. P. (2011). Physiological measures and self-report to evaluate neutral virtual reality worlds. *Journal of Cyber Therapy and Rehabilitation*, 4(1), 15–25.

Claremont, C. A. (1931). The psychology of seasickness. *Psyche*, 11, 86–90.

Coates, G. (1992). Program from Invisible Site-a virtual sho, a multimedia performance work presented by George Coates Performance Works. *San Francisco, CA*.

Covanis, A. (2006). Panayiotopoulos syndrome: a benign childhood autonomic epilepsy frequently imitating encephalitis, syncope, migraine, sleep disorder, or gastroenteritis. *Pediatrics*, 118(4), e1237–e1243.

Cruz-Neira, C. (1993). Virtual reality overview. In *SIGGRAPH* (Vol. 93, p. 1).

Cullen, K. E. (2012). The vestibular system: Multimodal integration and encoding of

- self-motion for motor control. *Trends in Neurosciences*, 35(3), 185–196.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2011.12.001>
- Davis, S., Nesbitt, K., & Nalivaiko, E. (2014). A Systematic Review of Cybersickness. *Proceedings of the 2014 Conference on Interactive Entertainment - IE2014*, 1–9.
<https://doi.org/10.1145/2677758.2677780>
- Dawson, M. E., Schell, A. M., & Fillion, D. L. (2000). The electrodermal system. *Handbook of Psychophysiology*. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.04.037>
- Digi-Capital. (2016). VR/AR investment in 2015 breaks out near \$700 million. *Digi-Capital.Com*, 2016(January), 2015–2017. Retrieved from <http://www.digi-capital.com/news/2016/01/arvr-investment-in-2015-breaks-out-near-700-million/#.V0PqIb7S6tu>
- Drexler, J. M. (2006). *Identification of system design features that affect sickness in virtual environments. ProQuest Dissertations and Theses*.
- Dziuda, Ł., Biernacki, M. P., Baran, P. M., & Truszczyński, O. E. (2014). The effects of simulated fog and motion on simulator sickness in a driving simulator and the duration of after-effects. *Applied Ergonomics*, 45(3), 406–412.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.05.003>
- Ebenholtz, S. M. (1992). Motion sickness and oculomotor systems in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(3), 302–305.
- Ericsson ConsumerLab. (2017). *Merged Reality*.
- Fernandes, A. S., & Feiner, S. K. (2016). Combating VR sickness through subtle dynamic field-of-view modification. *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 3DUI 2016 - Proceedings*, 201–210. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2016.7460053>
- Frank, L. H., Kennedy, R. S., McCauley, M. E., Root, R. W., & Kellogg, R. S. (1984). *Simulator sickness: Sensorimotor disturbances induced in flight simulators*. DTIC Document.

- Fuchs, H., & Bishop, G. (1992). *Research Directions in Virtual Environments*. Chapel Hill, NC, USA: University of North Carolina at Chapel Hill.s
- Ganglbauer, E., Schrammel, J., Deutsch, S., & Tscheligi, M. (2011). User Experience Evaluation – Which Method to Choose. *Human-Computer Interaction. INTERACT 2011 (Lecture Notes in Computer Science)*, 6949, 714–715.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-23768-3>
- Gianaros, P. J., Muth, E. R., Mordkoff, T., Levine, M. E., Mordkoff, J. T., Levine, M. E., & Stern, R. M. (2001). A questionnaire for the assessment of the multiple dimensions of motion sickness. *Aviat Space Environ Med*, 72(2), 115–119.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-02806-9_12
- Gigante, M. A. (1993). Virtual reality: definitions, history and applications. *Virtual Reality Systems*, 3–14.
- Golding, J. F. (1992). Phasic skin conductance activity and motion sickness. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*.
- Golding, J. F. (2006). Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Personality and Individual Differences*, 41(2), 237–248.
<https://doi.org/10.1016/j.paid.2006.01.012>
- Haapalainen, E., Kim, S., Forlizzi, J. F., & Dey, A. K. (2010). Psycho-Physiological Measures for Assessing Cognitive Load. *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Ubiquitous Computing*, 301–310.
<https://doi.org/10.1145/1864349.1864395>
- Halarnkar, P., Shah, S., Shah, H., Shah, H., & Shah, A. (2012). A Review on Virtual Reality. *International Journal of Computer Science Issues*, 9(6), 325–330.
- Hromatka, B. S., Tung, J. Y., Kiefer, A. K., Do, C. B., Hinds, D. A., & Eriksson, N. (2015). Genetic variants associated with motion sickness point to roles for inner ear development, neurological processes and glucose homeostasis. *Human Molecular Genetics*, 24(9), 2700–2708. <https://doi.org/10.1093/hmg/ddv028>

- Hufnagel, C., Chambres, P., & Auxiette, C. (2014). Les systèmes de monitoring du bien-être : application à l' anxiété dans les troubles du spectre autistique. *Le Bulletin Scientifique de L'arapi*, 34, 50–55.
- Johnson, D. M. (2005). Introduction to and Review of Simulator Sickness Research. *Social Sciences*, (April).
- Kelly, K., Heilbrun, A., & Stacks, B. (1989). Virtual reality: an interview with Jaron Lanier. *Whole Earth Review*, 64(108–120), 2.
- Kennedy, R. S., Berbaum, K. S., Lilienthal, M. G., Dunlap, W. P., Mulligan, B. E., & Funaro, J. F. (1987). Guidelines for Alleviation of Simulator Sickness Symptomatology, 559–563. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1933.tb04295.x>
- Kennedy, R. S., Drexler, J., & Kennedy, R. C. (2010). Research in visually induced motion sickness. *Applied Ergonomics*, 41(4), 494–503. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.11.006>
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire.pdf.
- Kennedy, R. S., Stanney, K. M., & Dunlap, W. P. (2000). Duration and exposure to virtual environments: Sickness curves during and across sessions. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5), 463–472.
- Keshavarz, B., & Hecht, H. (2011a). Axis rotation and visually induced motion sickness: The role of combined roll, pitch, and yaw motion. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 82(11), 1023–1029. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3078.2011>
- Keshavarz, B., & Hecht, H. (2011b). Validating an efficient method to quantify motion sickness. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53(4), 415–426. <https://doi.org/10.1177/0018720811403736>. Copyright
- Kim, Y. Y., Kim, H. J., Kim, E. N., Ko, H. D., & Kim, H. T. (2005). Characteristic

changes in the physiological components of cybersickness. *Psychophysiology*, 42(5), 616–625. <https://doi.org/10.1007/s00234-005-1388-2>

Kingdon, K. S., Stanney, K. M., & Kennedy, R. S. (2001). Extreme Responses to Virtual Environment Exposure, *15*, 1906–1910.

Kolasinski, E. (1996). *Prediction of simulator sickness in a virtual environment*.

Laborde, S., Mosley, E., & Thayer, J. F. (2017). Heart rate variability and cardiac vagal tone in psychophysiological research - Recommendations for experiment planning, data analysis, and data reporting. *Frontiers in Psychology*, 8(FEB), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00213>

Lavalle, S. M. (2015). *The Book of Virtual Reality. T+D*.

LaViola, J., & Joseph, J. (2000). A Discussion of Cybersickness in Virtual Environments. *SIGCHI Bulletin*, 32(1), 47–56.

Lo, W. T., & So, R. H. Y. (2001). Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes. *Applied Ergonomics*, 32(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(00\)00059-4](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(00)00059-4)

Mazuryk, T., & Gervautz, M. (1996). Virtual Reality - History, Applications, Technology and Future, 1–72. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-404705-1.00006-6>

McLellan, H. (1994). 15. virtual realities, (1992).

Meehan, M., Insko, B., Whitton, M., & Brooks Jr, F. P. (2002). Physiological measures of presence in stressful virtual environments. *ACM Transactions on Graphics; Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002, July 23, 2002 - July 26, 2002*, 21, 645–652. <https://doi.org/10.1145/566654.566630>

Munafa, J., Diedrick, M., & Stoffregen, T. A. (2016). The virtual reality head-mounted display Oculus Rift induces motion sickness and is sexist in its effects.

Experimental Brain Research, 235(3), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4846-7>

Muth, E. R., Stern, R. M., Thayer, J. F., & Koch, K. L. (1996). Assessment of the multiple dimensions of nausea: The nausea profile (NP). *Journal of Psychosomatic Research*, 40(5), 511–520. [https://doi.org/10.1016/0022-3999\(95\)00638-9](https://doi.org/10.1016/0022-3999(95)00638-9)

Nichols, S., CHaldane, C., & Wilson, J. R. (2000). Measurement of presence and its consequences in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52(3), 471–491. <https://doi.org/10.1006/ijhc.1999.0343>

Oman, M. (1990). Motion sickness : a synthesis and evaluation of the sensory conflict theory. *Can J Physiol Pharmacol*, 68, 294–303.

Patrao, B., Pedro, S., & Menezes, P. (2015). How to Deal with Motion Sickness in Virtual Reality. In *Sciences and Technologies of Interaction*. Retrieved from <http://scitecin.isr.uc.pt/Proceedings/Papers/EPCGI/17.pdf>

Plouzeau, J. (2017). *Apport des modalités vibratoires pour la navigation en environnement virtuel*.

Reason, J. T. (1978). Motion sickness adaptation: a neural mismatch model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71(11), 819–29. <https://doi.org/10.1177/014107687807101109>

Reason, J. T., & Brand, J. J. (1975). *Motion sickness*. Oxford, England: Academic Press.

Rebenitsch, L. R. (2015). *Cybersickness Prioritization and Modeling*. Michigan State University.

Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1991). An ecological theory of motion sickness and postural instability. *Ecological Psychology*, 3(3), 195–240.

Russell, M. E. B., Hoffman, B., Stromberg, S., & Carlson, C. R. (2014). Use of Controlled Diaphragmatic Breathing for the Management of Motion Sickness in a

- Virtual Reality Environment. *Applied Psychophysiology Biofeedback*, 39(3–4), 269–277. <https://doi.org/10.1007/s10484-014-9265-6>
- Segerstrom, S. C., & Nes, L. S. (2007). Heart Rate Variability Reflects Effort, Strength, and Fatigue. *Psychological Science*, 18(3), 275–281. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01888.x>
- Sharkey, T. J., & McCauley, M. E. (1992). Does a motion base prevent simulator sickness. *Proceedings of the AIAA/AHS Flight Simulation Technologies Conference*, (December), 21–28. <https://doi.org/doi:10.2514/6.1992-4133>
- Shi, Y., Park, T., Ruiz, N., Taib, R., Choi, E. H. C., & Chen, F. (2007). Galvanic Skin Response (GSR) as an Index of Cognitive Load. *CHI EA '07 CHI '07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2651–2656. <https://doi.org/10.1145/1240866.1241057>
- Stanney, K. M., Hale, K. S., Nahmens, I., & Kennedy, R. S. (2003). What to expect from immersive virtual environment exposure: Influences of gender, body mass index, and past experience. *Human Factors*, 45(3), 504–520. <https://doi.org/10.1518/hfes.45.3.504.27254>
- Stanney, K. M., Hale, K. S., Nahmens, I., & Kennedy, R. S. (2003). What to expect from immersive virtual environment exposure: influences of gender, body mass index, and past experience. *Human Factors*, 45(3), 504–520. <https://doi.org/10.1518/hfes.45.3.504.27254>
- Stanney, K. M., Lanham, D. S., Kennedy, R. S., & Breaux, R. (1999). Virtual environment exposure drop-out thresholds. *Human Factors and Ergonomics Society 43rd Annual Meeting*, 1223–1227.
- Stoffregen, T. A., Faugloire, E., Yoshida, K., Flanagan, M. B., & Merhi, O. (2008). Motion Sickness and Postural Sway in Console Video Games. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(2), 322–331. <https://doi.org/10.1518/001872008X250755>

- Stoffregen, T. A., Hettinger, L. J., Haas, M. W., Roe, M. M., & Smart, L. J. (2000). Postural Instability and Motion Sickness in a Fixed-Base Flight Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 42(3), 458–469. <https://doi.org/10.1518/001872000779698097>
- Treisman, M. (1977). Motion Sickness: An Evolutionary Hypothesis. *Science*, 197(4302), 493–495. <https://doi.org/10.1126/science.301659>
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225–240. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>
- Wood, B. (2015). CCS Insight Releases First Forecast of These Rising Technologies, (June 2015), 2018–2020.
- Wu, W., & Lee, J. (2009). Improvement of HRV methodology for positive/negative emotion assessment. *Proceedings of the 5th International ICST Conference on Collaborative Computing: Networking, Applications, Worksharing*. <https://doi.org/10.4108/ICST.COLLABORATECOM2009.8296>

Motion Sickness Susceptibility Questionnaire Short-form (MSSQ-Short)

Partie 2

(Golding, 2006)*

Votre expérience au cours des **DIX DERNIÈRES ANNÉES**

3. Au cours de ces **DIX DERNIÈRES ANNÉES**, à quelle fréquence vous êtes-vous senti malade ou nauséux dans les situations suivantes (Cocher la case correspondante) :

	Moyen de transport jamais utilisé	Jamais malade	Rarement malade	Parfois malade	Fréquemment malade
en voiture					
en bus/autocar/autobus					
en train					
en avion/hélicoptère/...					
Sur un bateau de petite taille (barque, vedette, voilier...)					
Sur un bateau de grande taille (ferry, cargo, traversier...)					
Sur une balançoire					
Sur un tourniquet					
Dans un parc d'attractions (montagnes russes, manèges...)					
	t	0	1	2	3

Annexe 2 : Questionnaire SSQ

SIMULATOR SICKNESS QUESTIONNAIRE

(Robert S. Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993)***

Instructions : Entourer le degré d'importance que vous ressentez en ce moment pour chaque symptôme ci-dessous :

1. Inconfort général	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
2. Fatigue	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
3. Mal de tête	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
4. Fatigue oculaire	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
5. Attention difficile	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
6. Salivation accrue	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
7. Transpiration	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
8. Nausée	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
9. Concentration difficile	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
10. Impression d'avoir la tête pleine	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
11. Vision floue	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
12. Etourdissement les yeux ouverts	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
13. Etourdissement les yeux fermés	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
14. Vertige*	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
15. Conscience de l'estomac**	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>
16. Rots	<u>Aucunement</u>	<u>Légèrement</u>	<u>Modérément</u>	<u>Gravement</u>

*Le vertige est connu comme une perte d'orientation par rapport à l'axe vertical

**L'expression « conscience de l'estomac » est généralement utilisée pour indiquer un ressenti désagréable proche de la nausée

Annexe 3 : Méthodologie détaillée

1. Recrutement

Les participants ont été recrutés par le biais du panel de participants à la recherche de HEC Montréal. Ce panel est principalement constitué de jeunes professionnels de la génération des milléniaux (entre 20 et 30 ans).

Plusieurs critères spécifiques de sélection ont été établis pour la participation à cette étude.

D'une part, les participants devaient répondre aux critères démographiques suivants:

- Avoir plus de 18 ans ;
- Comprendre le français et l'anglais, à l'oral et à l'écrit, à un niveau avancé ;
- Pouvoir utiliser un casque de réalité virtuelle sans lunettes de correction pour la vue ;
- Ne pas avoir vécu d'immersion en réalité virtuelle durant les 30 derniers jours.

D'autre part, les participants à l'étude devaient respecter les critères d'éligibilité normalement utilisés pour des études en psychophysiology, soit:

- Ne pas avoir d'allergies cutanées ou sensibilités particulières ;
- Ne pas avoir de stimulateur cardiaque ;
- Ne pas avoir de diagnostic neurologique ou psychiatrique ;
- Ne pas souffrir d'épilepsie ;
- Ne pas avoir de problème de santé diagnostiqué ;
- Ne pas s'être fait de teinture capillaire dans le dernier mois (pour ne pas endommager les équipements).

83 personnes ont postulé pour contribuer à l'étude. Pour participer, en plus de nous fournir leurs informations, ils devaient remplir le questionnaire MSSQ (Motion Sickness Susceptibility Questionnaire) (Annexe 1). Ce questionnaire permet d'évaluer de manière autodéclarée la propension au mal des transports d'un individu.

Dans le but d'équilibrer l'échantillon de participants, une approche par quota d'échantillonnage a été utilisée. Les participants ont été sélectionnés en fonction de leur sexe et de leur sensibilité au mal des transports. Quatre profils ont été mis en place : "HH", "FH", "HL" et "FL". La première lettre correspond au sexe du participant (H pour Homme et F pour Femme). La deuxième lettre correspond à leur niveau de sensibilité au mal des

transports fondé sur leur score de MSSQ (L pour Low et H pour High). Par exemple, un homme sensible au mal des transports se retrouvera dans la famille de profil “HH”.

- Un participant était considéré « High » si son score était au-dessus de la médiane des personnes du même sexe ayant répondu au MSSQ.
- Un participant était considéré « Low » si son score était en dessous de la médiane des personnes du même sexe ayant répondu au MSSQ.
- Au total, nous avons comptabilisé le score MSSQ de 83 personnes pour définir nos médianes homme et femme.

Nous avons finalement sélectionné 46 participants (24 hommes et 22 femmes) d’une moyenne d’âge de 24 ans. Parmi ces 46 participants, 24 ont vécu l’expérience avec le fauteuil en mouvement (condition A) et 22 avec le fauteuil sans mouvement (condition B).

Le tableau 2 présente un sommaire des caractéristiques des 46 participants.

Tableau 2. Récapitulatif des participants à l’étude

n° participant	Sexe	Age	Profil	Condition	n° participant	Sexe	Age	Profil	Condition
P10	Homme	29	HH	A	P34	Femme	22	FH	A
P11	Femme	23	FH	B	P35	Femme	26	FH	A
P12	Femme	22	FH	A	P36	Femme	21	FH	A
P13	Femme	26	FH	B	P37	Femme	21	FH	A
P15	Femme	21	FH	B	P38	Femme	21	FH	B
P16	Homme	26	HH	A	P39	Femme	20	FH	B
P17	Femme	22	FL	B	P40	Femme	26	FL	A
P18	Femme	25	FL	A	P42	Femme	26	FL	B
P19	Homme	22	HL	B	P44	Homme	22	HL	A
P20	Femme	21	FL	A	P46	Femme	27	FH	A
P21	Homme	23	HH	B	P47	Homme	28	HL	B
P22	Homme	23	HL	A	P48	Femme	43	FL	A
P23	Homme	24	HL	B	P50	Homme	28	HL	A
P24	Homme	21	HH	B	P52	Femme	22	FH	B
P25	Homme	23	HL	A	P53	Femme	24	FH	A
P26	Homme	21	HL	B	P54	Homme	22	HH	A
P27	Homme	21	HL	B	P56	Homme	45	HH	A
P28	Homme	23	HL	A	P57	Homme	25	HH	B
P29	Homme	25	HL	B	P58	Homme	25	HH	B
P30	Homme	26	HL	A	P59	Homme	20	HH	A
P31	Homme	23	HH	B	P60	Homme	21	HH	B
P32	Femme	21	FH	B	Pt04	Homme	21	HL	A
					Pt09	Femme	27	FL	B

Comme dans toute expérience psychophysiological comportant plusieurs outils de mesure, les données d’un certain nombre de participants à l’étude ont dû être retranchées

de l'échantillon final en raison de problèmes techniques. Ainsi, seules les données de 45 utilisateurs ont été utilisées pour les fins du présent rapport.

La figure 1 présente la répartition du score MSSQ en fonction de l'âge et du sexe des participants

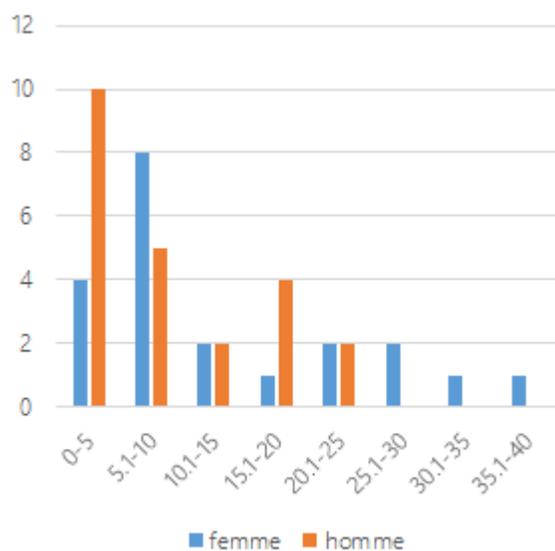


Figure 1. Répartition du score MSSQ Femme-Homme

Le graphique (Figure 2) suivant présente la répartition du score MSSQ en fonction de la condition

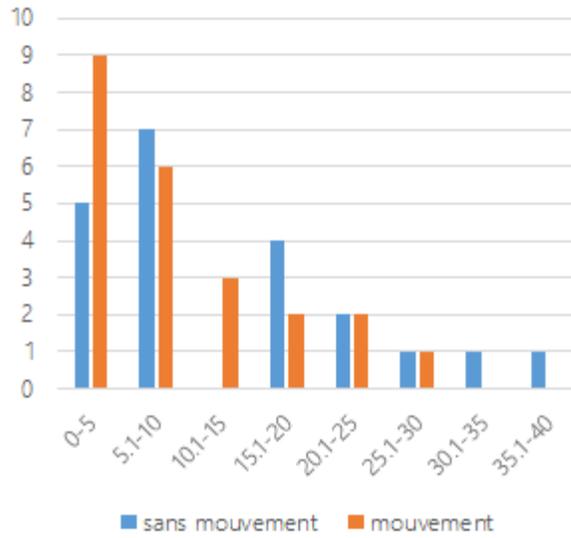


Figure 2. Répartition du score MSSQ en fonction de la condition

Enfin, le graphique suivant (Figure 3) présente le score du MSSQ en fonction de l'assignation par condition.

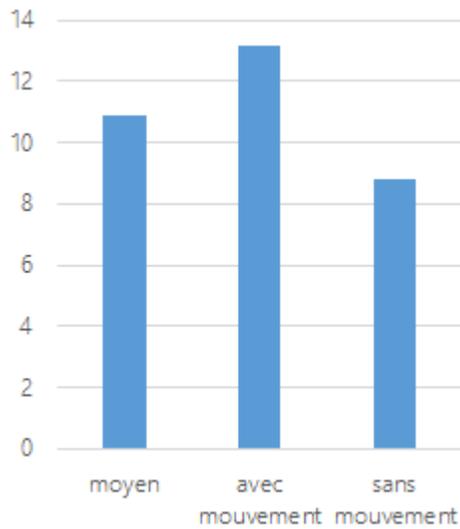


Figure 3. Score du MSSQ par condition

2. Design expérimental

L'expérience comportait 7 étapes (Figure 4) :

1. Recrutement (Questionnaire MSSQ - Motion Sickness Susceptibility Questionnaire)
2. Avant expérience (Questionnaire SSQ1)
3. Passation de l'expérience
4. Après l'expérience (Questionnaire SSQ2)
5. Entrevue qualitative avec le participant
6. Questionnaire de personnalité (Questionnaire HEXACO)
7. 25 minutes après l'expérience (Questionnaire SSQ3)



Figure 4. Déroulement de l'expérience

Lors de l'étude principale, la procédure était la suivante pour chacun des participants :

1. Le participant devait tout d'abord remplir le questionnaire SSQ. Celui-ci se concentre exclusivement sur 16 symptômes que l'on peut classer en 3 grandes catégories : oculomoteur, désorientation et nausées. En notant chaque symptôme de 0 à 4, il est possible d'attribuer un score final à un individu. Ce score n'est pas fait pour aider à prévenir les maux liés au mal des transports, mais il permet d'avoir une description globale fidèle au confort de l'individu avant et à la fin de son immersion.
2. Une fois le SSQ rempli, nous rappelions au participant qu'il allait vivre une expérience de réalité virtuelle d'une dizaine de minutes et qu'il était possible qu'il ressente les symptômes de mal de la réalité virtuelle. Nous lui indiquions qu'il devait enlever le casque afin de mettre un terme à l'immersion dès que l'expérience devenait trop inconfortable.
3. Par la suite, nous aidions le participant à placer l'Oculus Rift sur son visage puis nous lançons les stimuli. Nous faisons en sorte que les 3 expériences de réalités

virtuelles s'enchaînent sans perturber l'expérimentateur et dans le même ordre à chaque fois (du plus calme au plus intense : tour de piste, tour de montagne russe puis manège).

4. Immédiatement après l'immersion, il devait compléter une nouvelle fois un formulaire SSQ afin que l'on puisse recueillir son ressenti à chaud sur les symptômes propres au mal de la réalité virtuelle qu'il pourrait connaître suite à l'expérience.
5. Ensuite, une entrevue individuelle était menée avec le participant. Le guide de discussion est présenté à l'Annexe 2. Le but de cette entrevue était de capturer le ressenti du participant suite à ce qu'il venait de vivre.
6. Pour finir, le participant devait remplir le questionnaire de personnalité HEXACO puis une nouvelle fois le SSQ avant de mettre fin à l'expérimentation.

3. Protocole expérimental

Pour répondre aux questions de recherche, nous comparerons les données physiologiques dérivées entre les participants groupés selon le mouvement de leur siège, l'arrêt de l'expérience et leur profil. Ces diverses conditions de contrôle permettront de comprendre l'amplitude du perçu et du vécu sur les classes de participants, et ainsi sur les groupes démographiques. Une gamme de tests sur les moyennes, de régressions linéaires ARMA et de corrélations non-paramétriques nous permettra de porter des conclusions quant aux différences entre les groupes.

Pour répondre aux questions de recherche, nous croiserons les données selon le profil des participants (HL, FL, HH, FH), leur condition (mouvement, sans mouvement) et en fonction de si le participant avait arrêté l'expérience avant la fin ou non (selon s'il se sentait mal ou non).

Pour les besoins de l'analyse du rythme cardiaque et pour mieux comprendre ce qui se passe chez un participant qui stoppe l'expérience, nous analyserons aussi nos données en fonction de quatre périodes :

- La baseline (90 secondes)
- L'expérience complète (une dizaine de minutes)
- La dernière minute (relative à chaque participant en fonction du moment où il a arrêté)
- L'expérience sans la dernière minute

Concernant l'analyse de l'EDA, nous aurons besoin de comparer tous les participants selon la même échelle. Pour cela, un score d'« activation à la minute » a été développé. Il s'agit d'un indice construit par la somme des différences d'amplitudes dans le SCL attribuées aux SCR, divisée par la période (soit 60 secondes pour la dernière minute, soit la durée de l'expérience sans la dernière minute). L'activation à la minute permet ainsi de résumer l'engagement dans une certaine période. Enfin, dans le but de normaliser les mesures de sudation (certaines personnes peuvent être plus réactives que d'autres), nous poserons simplement le rapport entre la sudation par minute de la dernière minute et celle durant le reste de l'expérience.

4. Matériel

Une gamme d'outils a été mobilisée pour mesurer l'expérience durant l'utilisation du siège. Les tableaux suivants (Tableaux 3-4) présentent les outils logiciels et les équipements utilisés durant la collecte de données.

Tableau 3. Liste des équipements utilisés pour l'expérimentation

Équipement	Description	Manufacturier
Caméras (x1)	Enregistrement de l'écran, visage du participant et de l'entrevue	Logitech (Newark, USA)
Électrodes ECG et EDA	Posés sur la surface de la peau pour mesurer l'activité électrique du cœur (ECG) et l'activité des glandes de la sudation et du système nerveux autonome (EDA)	Biopac (Goleta, USA)

Tablette	Utilisé pour l'administration des questionnaires	Asus Nexus 7 (Taipei, Taiwan)
Fauteuil D-BOX	Fauteuil sur lequel les participants s'asseyaient pendant l'expérience. Le fauteuil est conçu pour bouger en fonction de ce que voit l'expérimentateur immergé en réalité virtuelle. Était allumé ou non en fonction de la condition de l'expérimentation.	D-BOX Technologies (Longueuil, Canada)
Oculus Rift CV1	Casque de réalité virtuelle utilisé pour administrer les stimuli au participant.	Oculus VR, LLC (Menlo Park, CA)

Tableau 4. Liste des logiciels utilisés pour l'expérimentation

Logiciel	Description	Éditeur
Media Recorder	Logiciel d'enregistrement vidéo et audio	Noldus (Wageningen, Pays-Bas)
FaceReader	Logiciel d'analyse de micro expressions faciales	Noldus (Wageningen, Pays-Bas)
Observer XT	Logiciel de marqueurs et de synchronisation des outils	Noldus (Wageningen, Pays-Bas)
Acqknowledge	Logiciel de capture et d'analyse de l'activité électrodermale et du rythme cardiaque	BIOPAC (Goleta, USA)
Teamviewer	Logiciel de contrôle de l'ordinateur de présentation des films à distance	Teamviewer (Göppingen, Allemagne)
D-BOX Cinemotion Player	Logiciel de contrôle des séquences	D-BOX Technologies (Longueuil, Canada)
GoPro VR Player	Logiciel de lecture de vidéo à 360 degrés	Kolor SAS (Francin, France)
Manège 3D	Attraction en réalité virtuelle	

Le type de lunettes de réalité virtuelle utilisé ainsi que la durée de l'expérience semblent avoir une grande influence sur mal des transports. Le système à faible coût Cybermind Visette Pro utilisé durant 50 minutes a eu une incidence sur 59% des participants, tandis que le système Oculus Rift DK2 utilisé durant 15 minutes a eu une incidence sur 22% (Munafo, Diedrick, & Stoffregen, 2016). Le système que nous utiliserons est la version plus récente de l'Oculus Rift, le CV1. Entre la version DK2 et la version CV1 de nombreuses améliorations ont été apportées telle que la possibilité d'ajuster la distance interpupillaire et la diminution du poids du boîtier.



Figure 5. Oculus Rift CV1

Pour plonger nos utilisateurs en réalité virtuelle, nous avons un grand choix de HMD. Dans notre cas, nous utiliserons l'Oculus Rift CV1 fourni par D-Box. Il s'agit de la version grand public dont les caractéristiques sont décrites dans le Tableau 7.

Tableau 5. Caractéristiques techniques du CV1

Écrans	OLED
Résolution	2160 x 1200 pixels
Fréquence de rafraichissement	90Hz
Champ de vision	110 degrés
Surface de localisation	5 x 11 pieds
Audio	Oui
Micro	OUI

Capteur	Accéléromètre, gyroscope, magnétomètre, Camera de tracking de « constellation »
Exigence technique	NVIDIA GeForce GTX 960 / AMD Radeon RX 470 ou plus Intel Core i3-6100 / AMD FX4350 ou plus 8GB+ RAM Compatible HDMI 1.3 video output 2x ports USB 3.0 Windows 7 SP1 ou plus récent

5. Sécurité du participant

Les personnes participant à l'expérience pouvaient à tout moment retirer leur casque si elles le souhaitent. Pour gérer les cas les plus graves, un secouriste était présent lors de chaque expérimentation pour prévenir les cas d'étourdissement grave ou autres problèmes qui pourraient survenir.

Après la fin de l'expérience, chaque personne était invitée à rester une dizaine de minutes dans la salle d'expérimentation pour s'assurer qu'elle ne connaisse pas d'effet de mal de la RV post immersion. Cela permet ainsi de récupérer de l'immersion et d'éviter les problèmes de désorientation qui constituerait un danger pour la personne si elle compte faire une activité comme du sport ou de la conduite juste après l'expérience.

6. Analyse

6.1 Tests sur les moyennes

Afin de comparer les moyennes de mesures physiologiques entre deux groupes de participants, l'approche préconisée est de procéder à des tests de Student hétéroscédastiques, soit à variances inégales. En effet, puisque la taille des groupes diffère et que leur variance n'est pas estimée *a priori*, ces tests permettent de conclure si une différence entre la moyenne de deux groupes est significative. Nous cherchions à maintenir un taux de significativité de 95% (19 fois sur 20) tout au long de l'expérience.

6.2 Tests entre variables discrètes et continues

Pour les variables non-binaires (ex. Score SSQ2, MSSQ), nous cherchions à mesurer leur corrélation soit à des groupes, soit à des mesures physiologiques continues. Puisqu'il ne s'agissait plus de comparer des valeurs groupées, nous avons utilisé leurs corrélations non-paramétriques pour nous prononcer adéquatement sur tout lien pouvant unir des variables. Étant donné que nos échantillons étaient généralement petits, le coefficient de corrélation de Spearman est approprié, principalement pour sa nature non-paramétrique. En effet, il compare les rangs (voir percentiles dans des échantillons discrets) des variables concernées plutôt que leur valeur et permet ainsi de détecter des relations non-linéaires entre deux séries de valeurs.

6.3 Régressions linéaires ARMA

Plusieurs mesures physiologiques (ex. SCL) peuvent être modélisées par des séries temporelles puisque leurs fluctuations dépendent de leur valeur passée. Pour analyser ces mesures avec justesse, nous avons simplement appliqué un modèle AR1 (autorégressif d'ordre 1) à ces séries temporelles. Enfin, pour comparer l'évolution des dites séries temporelles (i.e. leur tendance à travers le temps), les coefficients issus de la régression linéaire ont été comparés afin de déterminer s'ils étaient significativement différents pour des groupes distincts.

Annexe 4 : Complément de littérature

Cette section présente un sommaire de la littérature sur le mal de la RV ainsi que les mesures psychométriques et psychophysiologiques pour le mesurer.

1. Réalité virtuelle

1.1 Définition

La réalité virtuelle peut être définie comme une technologie intégrant des logiciels et du matériel informatique pour permettre aux utilisateurs d'être complètement immergés dans un environnement virtuel en 3D et en temps réel. L'individu plongé dans cet environnement pourrait théoriquement voir, écouter, contrôler, interagir, parler et même sentir des odeurs.

On peut trouver de nombreuses définitions dans la littérature. Certaines prennent en compte les technologies utilisées, mais sur le fond, toutes se rejoignent et vont dans le sens de la définition que nous venons de donner.

En voici quelque unes :

Tableau 6. Définitions de la RV vues dans la littérature

Auteurs	Définitions	Notions présentes
(Halarnkar et al., 2012)	<i>« La réalité virtuelle est un environnement simulé par ordinateur. Il simule la présence physique d'une personne dans le monde réel et imaginaire. C'est une expérience entièrement immersive, absorbante et interactive d'une réalité alternative dans laquelle le participant se sent totalement immergé dans l'environnement au moyen d'équipements spéciaux d'interface homme-ordinateur. Les utilisateurs peuvent ressentir et toucher des objets simulés dans cet environnement, ce qui donne la perception que ces objets existent réellement. Ils peuvent interagir avec l'environnement virtuel soit par l'utilisation de périphériques d'entrée standards tels qu'un clavier et une souris, soit par des dispositifs multimodaux tels qu'un gant filé, un bras à bras polémique et/ou un tapis roulant omnidirectionnel »</i>	Technologie Présence Immersion Multisensoriel Interaction
(Coates, 1992)	<i>« La réalité virtuelle est une simulation électronique d'un environnement vécu grâce à un visiocasque ("head mounted eye</i>	Technologie 3D

	<i>goggles") et des vêtements câblés permettant à l'utilisateur final d'interagir dans des situations en trois dimensions réalistes »</i>	
(Fuchs & Bishop, 1992)	<i>« Graphiques interactifs en temps réel avec un modèle tridimensionnel, combiné à une technologie d'affichage qui prodigue à l'utilisateur l'immersion dans le monde créé ainsi qu'une manipulation directe »</i>	3D Technologie Immersion
(Gigante, 1993)	<i>« L'illusion de participation à un environnement synthétique plutôt que l'observation externe d'un tel environnement. La réalité virtuelle repose sur un visiocasque (Head tracker display) tridimensionnel, stéréoscopique, un système pisteur de main/corps et de son binaural. La réalité virtuelle est une expérience immersive et multisensorielle »</i>	Technologie 3D Immersion Multisensoriel
(Cruz-Neira, 1993)	<i>« La réalité virtuelle se réfère à des environnements générés par ordinateur tridimensionnel, immersifs, interactifs, multisensoriels, visualisés ainsi qu'à la combinaison des technologies nécessaires à la construction de ces environnements »</i>	3D Immersion Multisensoriel Technologie

Comme nous venons de le voir, toute RV est produite par un système. La principale caractéristique de tous les systèmes de RV est qu'ils fournissent un environnement créé par ordinateur ou par d'autres médias où l'utilisateur se sent présent, c'est-à-dire immergé physiquement, perspectivement et psychologiquement (McLellan, 1994).

Nous utiliserons la définition suivante : la RV est un environnement créé par ordinateur, accessible grâce un casque de RV, permettant à l'utilisateur d'être immergé dans un autre monde en 3D pouvant être totalement inventé ou recréé à partir de la réalité.

1.2 Industrie

La RV et les casques de RV sont en passe de devenir des produits pour le grand public. Le marché de la réalité augmentée (VA)/virtuelle augmente rapidement notamment grâce à de lourds investissements dans le secteur. Le rapport de Digi-Capital sur la réalité augmentée/virtuelle et la base de données des transactions RV/RA totalisent 686 millions de dollars de placements en réalité augmentée (RA) et virtuelle en 2015 et 1,2 milliard de dollars seulement au premier trimestre de 2016 (Digi-Capital, 2016). Ce chiffre traduit bien la tendance du marché : cet investissement au premier trimestre 2016 est 25 fois supérieur à l'investissement fait au deuxième trimestre 2014. Dans ce même rapport

(Digi-Capital, 2016), on peut voir que plus de 50% des 1,2 milliard de dollars investis au cours du premier trimestre de 2016 ont été consacrés au développement de casque de RV ("Head-Mounted Device") destiné à la réalité augmentée et à la réalité virtuelle. C'est aussi depuis cette année-là que les consommateurs du monde entier ont pu acheter la première version de l'Oculus Rift et du HTC Vive (Agency Bradant Development, 2017), participant ainsi à la démocratisation de la RV.

D'un point de vue utilisateur, 70% des adopteurs précoces (basé sur un sondage en ligne auprès de 9200 consommateurs de 15 à 69 ans dans différents pays) pensent que la RV/VA va changer drastiquement leur vie de tous les jours dans les domaines du média, de l'éducation, du travail, de leur interaction sociale, du voyage et de la vente de détails (Ericsson ConsumerLab, 2017). Par exemple, dans le domaine du média, 60% de ces adopteurs précoces pensent que les concerts interactifs et les évènements en RV seront chose commune d'ici les trois prochaines années. Concernant les retours haptiques, plus de la moitié de ces adopteurs précoces pensent qu'ils sont un élément important qui manque aux expériences de RV actuelle et que cet élément sera ajouté dans un futur proche (Ericsson ConsumerLab, 2017). Il est intéressant de noter que dans ces rapports d'étude de marché, le mal de la RV est peu discuté. Lorsqu'il l'est, il est question de problème de latence des casques de réalité virtuelle, un problème qui sera réglé très bientôt en améliorant simplement ces casques technologiquement. Lorsque cette technologie était à ses débuts, la latence engendrée par les casques était effectivement un facteur important dans l'apparition du mal de la RV.

Avec une fréquence d'image de 25 images par seconde, nous pouvons percevoir une scène monoscopique de manière fluide. Cela signifie qu'il suffirait d'un casque avec une fréquence de rafraîchissement de 50Hz pour capter correctement les mouvements. Naturellement, une scène plus dynamique nécessite une fréquence de rafraichissement plus élevée (Bouyer, 2007). Or, l'Oculus rift CV2 (Voir Annexe 3) que nous utilisons possède une fréquence de rafraichissement de 90 Hz, ce qui est largement suffisant pour réduire significativement l'impact de la latence de l'image sur le mal de la RV. Aujourd'hui, les casques disponibles pour le grand public sont assez puissants pour que

ce facteur soit réduit au minimum. Nous discutons du reste des facteurs et approfondissons le sujet du mal de la RV dans la partie suivante.

2. Le mal de la réalité virtuelle

2.1 Définition

Le terme mal de la RV, aussi connu sous le nom anglais « cybersickness », « Virtual Reality sickness » ou encore « VR sickness », fait référence à une forme spécifique du mal des transports (MdT) (« motion sickness »). Ce mal ne peut seulement être connu des personnes immergées en RV où elles ont l'impression de se déplacer dans la scène tout en restant stationnaires (Rebenitsch, 2015). Le mal de la RV se définit comme le fait de sentir des symptômes propres au mal des transports dans un environnement virtuel (EV).

Le fait d'être malade à cause du MdT est reconnu depuis bien longtemps. Des documents datant de l'époque de la Grèce ancienne parlaient déjà des marins ressentant le mal de mer (Reason & Brand, 1975). Le MdT est induit lorsque de vrais mouvements sont produits par une force à laquelle on serait inhabituellement exposé (Lavalle, 2015). On peut ressentir ses effets en tournant plusieurs fois sur soi-même, ou encore en faisant des tours de manège, en prenant le bateau, la voiture ou toute autre sorte d'activité incluant un déplacement. Le MdT se caractérise par une trentaine de symptômes qui ont été clairement définis dans l'étude « Studies of the effects of sea motion on human performance » (Abrams et al., 1971). On y retrouve vomissements, nausées, pâleur et sueurs froides, ou encore des symptômes incluant somnolence, confusion, difficulté à se concentrer, plénitude de la tête, vision floue et fatigue oculaire.

Dans la littérature actuelle sur le mal de la RV, on catégorise cette forme de MdT comme un MdT induit visuellement (« visually induced motion sickness » (Keshavarz & Hecht, 2011a; Rebenitsch, 2015). Cette catégorie référence les MdT qui surviennent lorsqu'un individu est exposé visuellement à un motif de mouvement alors que cette même personne n'est pas physiquement en mouvement. On y retrouve donc aussi des MdT comme le mal des simulateurs ou encore le mal du cinéma.

Le Tableau 2 présente les symptômes typiques du mal de la RV fondés sur cinq études sur le thème du mal de la RV.

Tableau 7. Symptômes communs au mal de la réalité virtuelle

Nom des Symptômes	Description
Nausée	Sous forme légère, les utilisateurs peuvent commencer à ressentir des sensations désagréables associées à l'estomac, à l'abdomen, à l'œsophage ou à la gorge. Comme lorsque l'intensité augmente, elle mène progressivement à la sensation de besoin de vomir. C'est le symptôme le plus négatif et le plus intimidant du mal de la RV.
Vertige	Les utilisateurs peuvent ressentir une sensation de mouvement, comme le tournis, la perte d'équilibre ou le balancement, même après que le stimulus a été retiré. Cela peut également inclure le vertige, qui est similaire et souvent associé à des organes vestibulaires défectueux.
Somnolence	Les utilisateurs deviennent moins vigilants, bâillent et commencent à s'endormir.
Augmentation de la salivation	La quantité de salive dans la bouche augmente, poussant à déglutir plus que d'habitude.
Transpiration à froid	Les utilisateurs commencent à transpirer ou à augmenter leur sueur, mais ce n'est pas dû à une température ambiante accrue.
Pâleur	Les utilisateurs connaissent un blanchissement ou une perte de la couleur naturelle de leur peau sur le visage, et éventuellement les oreilles, le cou et la poitrine.
Rougisement Chaleur	- Réaction qui correspond à une augmentation soudaine de la chaleur perçue, semblable à une onde de fièvre.
Maux de tête	Les utilisateurs développent des maux de tête qui peuvent augmenter progressivement en intensité et rester longtemps après leur utilisation.

Fatigue	Les utilisateurs peuvent être fatigués ou épuisés après une longue expérience.
Fatigue des yeux	Les utilisateurs ont l'impression que leurs yeux sont fatigués, épuisés, sensibles ou douloureux.
Problème d'accommodations	Les utilisateurs peuvent avoir une vision floue ou de la difficulté à se concentrer.

Le vomissement est souvent le symptôme le plus cité dans la littérature pour parler du mal de la RV. Pourtant, le nombre de personnes qui vomissent après une immersion est très faible. Dans leur expérience, Stanney et al. (2003) ont plongé 1102 étudiants (15 à 53 ans) en RV pendant 15 à 60 minutes. En définitive, moins de 2% des personnes immergées ont fini par se sentir mal au point de vomir (Kingdon, Stanney, & Kennedy, 2001).

Il n'existe pas de solution ou de modèle prédictif général au mal de la RV, car chaque facteur est pris en compte indépendamment d'une configuration particulière. En d'autres termes, la seule méthode pour chaque expérience/application/configuration consiste à tester directement les effets de mal de la RV avec les participants. (Rebenitsch, 2015).

2.2 Théories du Mal des Transports

Bien que le Mal des Transports (MdT) soit un problème connu et sans solution depuis longtemps, il aura fallu attendre le 19^{ème} siècle et les travaux d'Irwin, pour que la première théorie sur le MdT soit documentée en 1881 (Frank, Kennedy, McCauley, Root, & Kellogg, 1984; Reason, 1978; Reason & Brand, 1975). À cette époque, on parle d'une discordance entre les impressions visuelles réelles, immédiates, ainsi que d'une certaine habitude visuelle et des choses qui se passent dans la conscience comme un sentiment pénible d'incertitude, de vertiges et de nausées. Ceci est à la racine de la théorie moderne la plus populaire : la théorie des conflits sensoriels, également connue sous le nom de réarrangement sensoriel ou de théorie de l'incompatibilité neuronale.

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux principales théories sur le MdT, le but étant de mieux comprendre ce que nos participants peuvent vivre pendant notre expérience. Avant de plonger dans les théories, il est nécessaire de comprendre comment le corps humain fonctionne et notamment comment l'oreille interne fonctionne. L'implication du système vestibulaire est évidente dans le cas du MdT. En effet, des individus ayant complètement perdu leur appareil vestibulaire, une composante du système vestibulaire, ne peuvent pas connaître le mal des transports (Covanis, 2006)

2.3 Le système vestibulaire

Le système vestibulaire nous permet de remplir des tâches essentielles à chaque moment de notre vie, que ce soit aussi bien dans nos réflexes que dans les plus hauts niveaux de comportement volontaire (Cullen, 2012). C'est l'outil qui nous permet de détecter le mouvement et la position du corps (LaViola & Joseph, 2000). C'est aussi lui qui influence notre équilibre et signale au cerveau que nous nous déplaçons (Hromatka et al., 2015). Il se compose de trois canaux (Figure 1): canal supérieur, postérieur et horizontal qui forment à eux trois ce qui se rapproche de près à ce que les mathématiciens appellent un repère orthogonal.

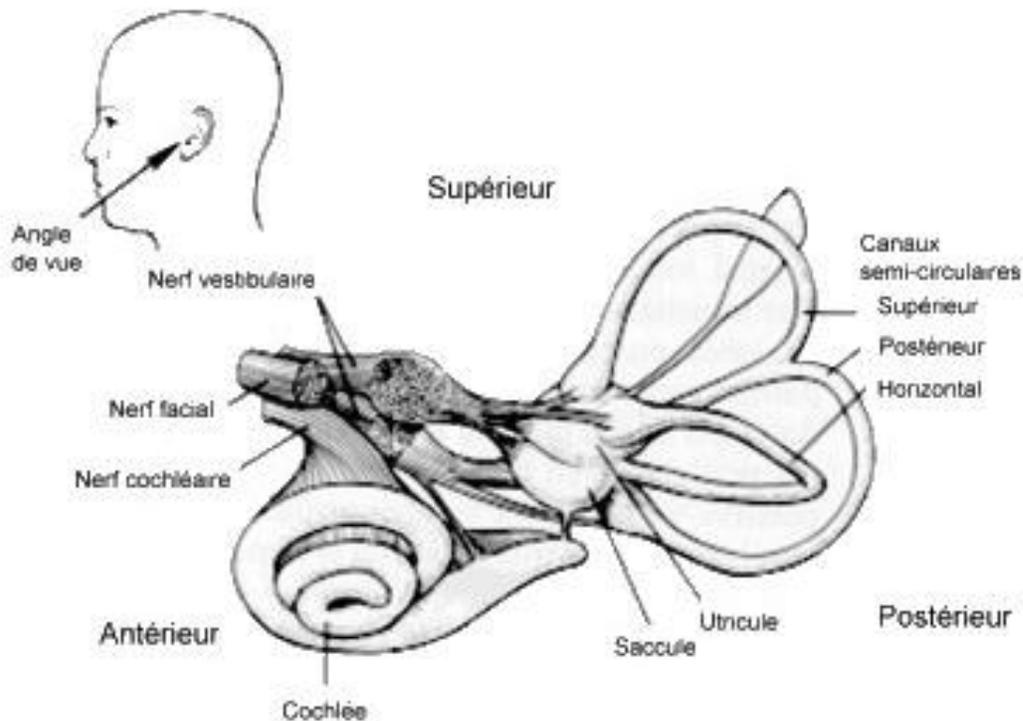


Figure 6. Représentation de l'anatomie de l'appareil vestibulaire (Blouin, 2004)

Chaque canal détecte les mouvements grâce au fluide qu'il contient (LaViola & Joseph, 2000). En bougeant, le fluide se déplace et fait bouger les cupulas, une sorte de petits cheveux, qui envoient des signaux aux zones réceptrices du cerveau (Reason & Brand, 1975). Finalement, on peut comparer le système vestibulaire humain à l'accéléromètre de nos téléphones ou encore au niveau à bulle que l'on retrouve dans certains outils de bricolage.

2.4 Théorie des conflits sensoriels et de la verticale subjective

Apparue pour la première fois dans 'The psychology of seasickness' (Claremont, 1931), la théorie des conflits sensoriels explique que le phénomène survient lorsque le modèle d'"input" de différents sens et d'un seul sens ne correspondent pas au modèle prévu fondé sur les expériences passées (Kolasinski, 1996). D'après cette théorie développée par Reason et Brand (Reason & Brand, 1975), toutes les situations qui provoquent le MdT se caractérisent de la façon suivante : les informations de mouvement envoyées par les yeux, le système vestibulaire et les propriocepteurs non-vestibulaires ,i.e., les capteurs qui envoient l'information sur les postures et les mouvements venant des muscles et des

articulations, ne coordonnent pas entre elles ou en fonction de ce que l'individu attend, fondé sur ses expériences antérieures. D'après les auteurs, deux conflits principaux peuvent survenir : le conflit intersensoriel traitant d'une discordance visuelle-vestibulaire et le conflit intrasensoriel à l'oreille interne pour un conflit entre les canaux et les otolithes du système vestibulaire. En d'autres termes, cette théorie se fonde sur la divergence entre les stimulations sensorielles et les sensations attendues par l'utilisateur qui peut être due à un manque d'informations sensorielles ou simplement à une incohérence entre les retours sensoriels. Dans le cas de notre étude, le participant immergé en RV avancera tout seul en voyant l'environnement défiler sous ses yeux. À ce moment-là, il ressentira un sentiment devection lui donnant l'impression de se déplacer et d'avancer. Le phénomène devection est le sentiment que l'environnement s'éloigne de soi-même (Rebenitsch, 2015). Le meilleur exemple pour illustrer cela est celui du train. Tout le monde s'est déjà assis dans un train en regardant le train d'à côté par la fenêtre. Le train d'à côté se met à démarrer et nous avons l'impression que c'est nous qui bougeons, alors que notre train est toujours à l'arrêt. Lorsque l'on parle de sentiment devection, c'est de cette sensation de mouvement qu'il s'agit. Le principal conflit viendrait donc au moment où notre participant voit l'environnement défiler alors que son sens vestibulaire ne lui donne aucune sensation de mouvement. Si l'utilisateur avait vécu l'expérience dans la réalité, son système vestibulaire et son sens visuel auraient fourni des informations similaires sur le déplacement. C'est à cette compatibilité que l'on fait référence lorsque l'on parle de perception attendue.

Oman (Oman, 1990) s'est appuyé sur les travaux de Reason et Brand (1975) et a cherché à approfondir la théorie du conflit sensoriel. Il propose un modèle mathématique qui permet de quantifier les types de stimuli qui provoquent le malaise afin d'identifier le conflit qui en est responsable. Parmi ses différentes conclusions, celle qui nous intéresse concerne la différence entre le vecteur représentant les informations sensorielles disponibles et le vecteur représentant les informations sensorielles attendues. Plus la différence entre ces deux vecteurs est grande, plus il y a de chance qu'apparaisse un mal des transports et plus la sévérité de ce dernier augmentera, ce qui confirme une partie des travaux de R. Kennedy (Frank et al., 1984; R. S. Kennedy et al., 1987; Robert S. Kennedy, Drexler, & Kennedy, 2010) sur le MdT et plus spécifiquement sur le mal des simulateurs.

Un peu plus tard, Bles et al.(1998) se sont eux aussi intéressés à cette théorie et mènent une étude en supposant que seuls les mouvements de la tête qui changent son orientation par rapport au vecteur de gravité induisent le MdT. Leur étude a permis d'émettre une nouvelle théorie, alignée avec la théorie des conflits sensoriels déterminée 23 ans plus tôt, qui est fondée sur la détermination de la représentation interne de la verticale. Ils l'appellent la théorie de la Verticale Subjective et la définissent ainsi : « Toutes les situations qui provoquent le mal des transports sont caractérisées par une situation dans laquelle la verticale détectée, déterminée à partir de l'information intégrée des yeux, du système vestibulaire et des propriocepteurs non-ventriculaires, est en désaccord avec la verticale subjective prédite sur la base d'expérience antérieure » (Bles et al., 1998, p482). L'avantage de la théorie de la Verticale Subjective est qu'elle ne nécessite plus de faire la distinction entre les différents types de conflits, contrairement à la théorie originelle qui classe les conflits en deux grandes catégories ; ceux dus à une dissonance entre les informations envoyées et ceux qui ne correspondent pas à ce qui est attendu. Tout viendrait d'un conflit entre les informations qu'un individu reçoit et son sens de la verticale. Cette théorie est particulièrement intéressante dans notre cas étant donné que nous allons étudier la différence d'apparition de MdT entre une condition sans mouvement et avec mouvement, et donc potentiellement un conflit avec ce sens de la verticale.

2.5 Théorie des conflits sensoriels

Une autre théorie sérieuse est la théorie de l'instabilité posturale (Riccio & Stoffregen, 1991). Elle est fondée sur une approche écologique de la perception et du contrôle de l'orientation et de l'automouvement. Cette théorie admet que l'un des objectifs principaux du comportement de l'être humain est de maintenir sa stabilité posturale par rapport au milieu environnemental dans lequel il se trouve. En d'autres termes, cette théorie est axée sur le comportement plutôt que sur la stimulation des systèmes sensoriels. D'après les auteurs, le contrôle postural est fondamental pour toutes les interactions « perception-contrôle » avec l'environnement. La stabilité posturale étant déterminée par l'interaction des caractéristiques de l'environnement et les compétences de contrôle de l'individu (c'est-à-dire la capacité à maintenir ou rétablir la stabilité posturale dans une situation donnée).

L'instabilité posturale du corps augmente lorsque le corps est soumis à des ondes d'interférences dues à l'interaction de fréquences d'oscillations naturelles du corps d'une part et de fréquences d'oscillations imposées d'autre part. Stoffregen utilise cette théorie dans ses travaux (Riccio & Stoffregen, 1991; Stoffregen, Faugloire, Yoshida, Flanagan, & Merhi, 2008; Stoffregen, Hettinger, Haas, Roe, & Smart, 2000) pour prévenir le MdT avant que les symptômes n'apparaissent.

2.6 Théorie écologique : la théorie du poison

Cette théorie prend sa source dans le contexte de l'évolution des espèces (Treisman, 1977). Elle suggère que le vomissement est un moyen de défense du corps humain et que le cerveau induirait lui-même le phénomène de nausée pour permettre au corps de sortir un poison que l'individu aurait ingéré. L'ingestion de poison provoque des effets physiologiques impliquant la coordination du visuel, vestibulaire et d'autres systèmes d'input sensoriels. Retirer le poison de l'estomac augmente les chances de survie de l'individu. 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 (LaViola & Joseph, 2000). Le bienfait du vomissement apparaît de façon évidente lorsqu'il intervient en réponse à l'ingestion d'une substance potentiellement toxique. Il permet alors l'expulsion rapide et violente par la bouche du contenu, ou une partie du contenu, gastro-intestinal contaminé. Cette théorie est problématique car très difficile à mesurer dans le cadre de la recherche. De plus, dans le cadre de notre étude, elle ne permet pas d'expliquer pourquoi les individus tombent malades pendant leur immersion en RV.

2.7 Facteurs impactant l'apparition du mal de la Réalité virtuelle

L'âge d'un individu a un impact direct sur la possibilité de ressentir les symptômes liés au MdT. En effet, un enfant de moins de 2 ans est totalement immunisé au MdT (Reason & Brand, 1975). En revanche, entre 2 et 12 ans, la sensibilité à ce phénomène va grandement augmenter. Le pic de sensibilité qui survient entre 2 et 12 ans va s'inverser entre 12 et 21 ans puis va continuer à décroître lentement au fil des années (Allen, Singer,

McDonald, & Cotton, 1997). Chez un individu de 50 ans ou plus, le MdT est beaucoup plus rare, voire quasi inexistant. Notre étude comportant principalement des étudiants de plus de 20 ans, on peut s'attendre à ce que les symptômes d'inconfort apparaissent moins rapidement et moins violemment en comparaison à ce que le participant connaissait lorsqu'il était jeune.

La question d'un rapport entre le genre d'un individu et le MdT se pose depuis longtemps. La plupart des études sur le sujet s'entendent sur le fait que les femmes seraient plus sensibles au MdT que les hommes (Lavalle, 2015). Thomas Stoffregen, un kinésologue qui étudie le MdT depuis de nombreuses années, s'est penché sur cette question dans une étude récente [46]. Il a testé la susceptibilité de deux groupes d'étudiants constitués de 18 hommes et 18 femmes (soit 36 personnes par groupe) avec deux jeux en RV différents et en utilisant un casque Oculus Rift DK2. Dans le premier jeu, il fallait bouger une pièce dans un labyrinthe en utilisant les mouvements de sa tête pour la déplacer. Finalement, 22% des joueurs se sont sentis malade après les 15 minutes de jeux, mais il n'y avait pas de différence notable entre homme et femme. Le deuxième jeu, un jeu d'horreur nommé « Affected », consistait à se déplacer à l'aide d'une manette dans un bâtiment effrayant. Cette fois, 56% des joueurs se sont sentis malades au bout de 15 minutes. Ce résultat comprend 14 des 18 femmes (77.78%) contre seulement 6 hommes (33.33%) ce qui est une différence assez significative pour admettre l'hypothèse que les femmes sont plus sensibles au mal de la RV que les hommes. Dans notre étude, nous devons donc prêter attention aux résultats en fonction du genre de nos participants et nous assurer que nos échantillons sont correctement équilibrés.

L'habitude, le fait d'avoir déjà vécu des expériences de RV jouent aussi un rôle sur l'apparition des symptômes liés au mal de la RV. C'est pourquoi nous n'avons recruté que des participants n'ayant pas vécu d'immersion virtuelle au cours des 30 jours précédents. La littérature atteste que plus nous pratiquons une expérience virtuelle, moins nous sommes susceptibles de présenter les symptômes du mal de la RV (Patrao et al., 2015; K M Stanney, Hale, Nahmens, & Kennedy, 2003).

Le temps d'exposition est aussi l'un des facteurs majeurs pouvant induire le mal de la réalité virtuelle (Drexler, 2006). En effet, les chercheurs s'accordent à dire que le MdT se

développe avec le temps, plus le temps d'exposition au stimulus est important, plus les symptômes de MdT sont fréquents (Robert S Kennedy et al., 2000; Rebenitsch, 2015). On le voit dans l'étude « Virtual environment exposure drop-out thresholds » (1999), où les participants ont été invités à interagir dans un environnement virtuel pendant 15, 30, 45 ou 60 minutes [58]. Ils étaient amenés à réaliser plusieurs tâches durant leur immersion comme se déplacer en véhicule, manipuler des objets, suivre un point et des tâches de reconnaissance. Les résultats de cette étude indiquent que ceux qui n'ont pas complété leurs tâches durant la durée totale d'exposition en réalité virtuelle ont beaucoup plus de symptômes que ceux qui parviennent à finir. Les données collectées pour cette étude montrent une différence significative entre les groupes et non pas seulement entre certains individus qui ont quitté l'immersion même s'ils n'étaient pas malades.

3. Mesurer le Mal de la Réalité virtuelle

Il y a deux manières de mesurer une expérience de RV : de manière déclarée, il est possible de mesurer *a posteriori* l'expérience perçue par le biais de questionnaires. Ensuite, il est possible de mesurer l'expérience vécue par le biais de mesures psychophysiologiques, et ce durant l'immersion et l'utilisation du casque de RV.

3.1 Questionnaires

Dans la littérature sur le MdT et le mal de la RV, on retrouve couramment les mêmes questionnaires qui sont soumis aux participants, à savoir le « Motion Sickness Susceptibility Questionnaire » (MSSQ) et le « Simulator Sickness Questionnaire » (SSQ).

3.1.1 MSSQ

Le MSSQ, pour Motion Sickness Susceptibility Questionnaire (Golding, 2006), a été créé pour déterminer la sensibilité de chacun au MdT. Son but est d'aider à déterminer quelles sortes de mouvement sont les plus efficaces pour causer cette maladie. Par maladie, on entend un sentiment de malaise, avoir la nausée ou même vomir. Ce questionnaire existe en deux versions : une version longue et une version courte. D'après l'étude de Golding (2006), le MSSQ-Short (version courte du MSSQ) que nous utilisons pour notre expérience (Annexe 1) reste très fiable et très fidèle à la version originale du questionnaire

que proposaient Reason et Brand. C'est un compromis efficace entre la longueur (coût de temps réduit) et la validité (susceptibilité de mouvement prédite)

Le but du questionnaire est d'évaluer le niveau de maladie de l'individu interrogé en fonction de différents contextes. Le questionnaire prend en compte l'âge des individus et demande donc de remplir ce tableau (Figure X) deux fois : une fois en tant qu'enfant (avant 12 ans) et un fois en prenant compte de son état ces dernières années (les 10 dernières années approximativement) (Golding, 2006).

Le score final du MSSQ (pouvant aller de 0 à 54) correspond au score de la première partie (MSA) correspondant au score obtenu en remplissant le tableau rempli en tant qu'enfant, auquel on additionne le score de la seconde partie (MSB) qui correspond au score obtenu en remplissant le tableau en tant qu'adulte.

$$MSA = \frac{\text{score tableau partie 1} * 9}{9 - \text{nombre de type non vécu}}$$

$$MSB = \frac{\text{score tableau partie 2} * 9}{9 - \text{nombre de type non vécu}}$$

$$\text{Score MSSQ} = MSA + MSB$$

Un score élevé à ce questionnaire traduit une sensibilité élevée au mal des transports, ce qui est un facteur important pour comprendre les données que nous collecterons.

3.1.2 SSQ

Le SSQ (Annexe 2), pour Simulator Sickness Questionnaire (Robert S. Kennedy et al., 1993) est le questionnaire auto administré le plus utilisé dans le monde de la recherche sur le MdT dans un contexte de réalité virtuelle. Il est utilisé à de nombreuses reprises pour évaluer tant le mal des simulateurs (Johnson, 2005) que le mal de la RV (Bruck & Watters, 2009; Lo & So, 2001). Plusieurs questionnaires qui tentent d'évaluer le MdT ont vu le jour ces dernières années : le Motion Sickness Assessment Questionnaire (MSAQ),

le Fast Motion Sickness Scale (FMS), The Nausea Profile (NP) (Gianaros et al., 2001; Keshavarz & Hecht, 2011b; Muth, Stern, Thayer, & Koch, 1996). Contrairement à ceux-ci, le SSQ se concentre sur 16 symptômes (Tableau X) que l'on peut classer en trois grandes catégories : Oculomoteur, Désorientation et Nausées. Ce questionnaire est construit pour donner un score de confort à un individu.

En notant chaque symptôme de 0 à 3, il est possible d'attribuer un score final à un individu. Ce score n'est pas fait pour aider à prévenir les maux liés au mal des transports, mais il permet d'avoir une description globale fidèle du confort de l'individu à la fin de son immersion. Néanmoins, six symptômes (nausées, gêne générale, conscience de l'estomac, transpiration, augmentation de la salivation et vertige) ont révélé un lien fort avec le fait que les participants se sentent malades rapidement (Balk, Bertola, & Inman, 2013). Bien que développé en 1993 pour le mal du simulateur, ce questionnaire est encore approprié malgré l'évolution de la technologie (Balk et al., 2013) et est utilisé dans de nombreuses études sur le mal de la RV.

La répartition factorielle se fait de la manière suivante :

$$Nausée = (1 + 6 + 7 + 8 + 9 + 15 + 16) * 9.54 = N * 9.54$$

$$Oculomoteur = (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 9 + 11) * 7.58 = O * 7.58$$

$$Désorientation = (5 + 8 + 10 + 11 + 12 + 13 + 14) * 13.92 = D * 13.92$$

$$Total = (N + O + D) * 3.74$$

Grâce à cela, nous pouvons qualifier le SSQ score :

Tableau 8. Qualification du score SSQ

SCORE	ANALYSE
0	Pas de symptômes
<5	Symptômes négligeables
5-10	Symptômes minimales

10-15	Symptômes significatifs
15-20	Symptômes préoccupants
>20	Problème lié au simulateur

Dans la plupart des études (Bruck & Watters, 2009; Dziuda, Biernacki, Baran, & Truszczyński, 2014; Lo & So, 2001), ce questionnaire est administré une fois avant l'expérience et une fois juste après. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle met totalement au courant le participant des symptômes que nous allons chercher chez lui. Cela peut les déranger et même les sensibiliser sur leur état physique plus que la normale. (Rebenitsch, 2015)

3.2 Indicateur physiologique

Puisque les symptômes du mal des transports sont psychophysiologiques, on peut postuler que les méthodes de mesure psychophysiologiques permettront d'obtenir plus d'informations sur le phénomène. Les données psychophysiologiques sont également un index reconnu de l'état cognitif et émotionnel du sujet. Le design expérimental et l'analyse statistique permettront d'interpréter ces données.

3.2.1 Système nerveux

Le système nerveux autonome régit tous les systèmes du corps humain s'exerçant en dehors du contrôle volontaire et conscient. Ce système se divise en deux portions (Figure 7), le système nerveux sympathique et le système nerveux parasympathique. Les deux portions du système nerveux autonome s'activent alternativement. L'activation du système nerveux sympathique prépare l'organisme à l'action. En réponse à un stress, il orchestre la réponse dite de combat ou de fuite (« fight or flight ») qui entraîne une dilatation des bronches, une accélération de l'activité cardiaque et respiratoire, une augmentation de la tension artérielle, une dilatation des pupilles, une augmentation de la transpiration, une diminution de l'activité digestive (Bear & Connors, 2016).

Ce système est associé à l'activité de deux neurotransmetteurs : la noradrénaline et l'adrénaline.

L'activation du système nerveux parasympathique ou système vagal, à l'inverse, correspond à une réponse de relaxation. Il induit un ralentissement général des fonctions de l'organisme. Le rythme cardiaque et l'activité respiratoire sont ralentis et la tension artérielle diminuée. La fonction digestive et l'appétit sexuel sont favorisés (Bear & Connors, 2016).

Les outils de mesure physiologique (l'électrocardiogramme par exemple) permettent de mesurer les effets de l'activité du système nerveux autonome et d'utiliser les résultats afin d'inférer l'état du participant. La section suivante présente chacun des outils utilisés.

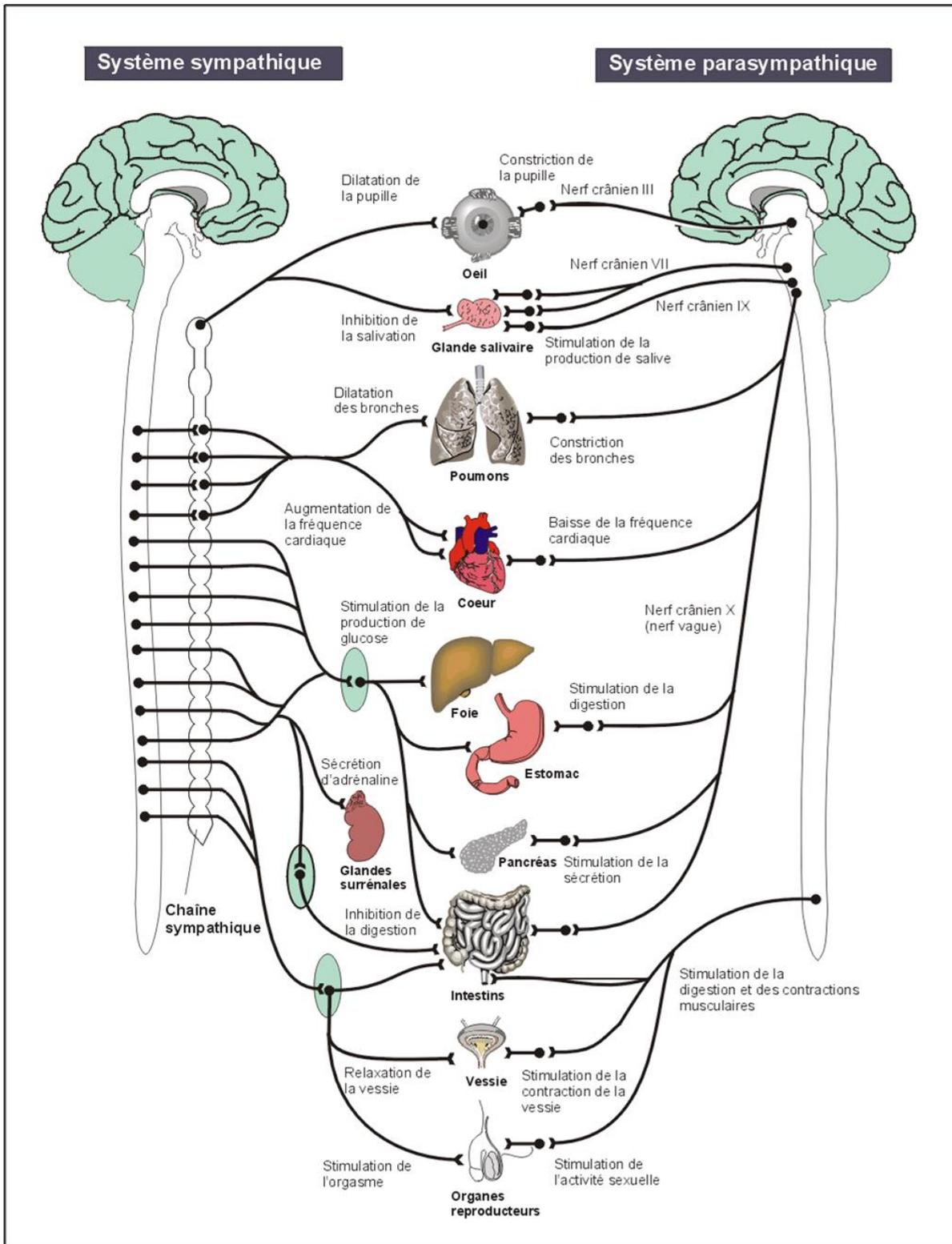


Figure 7. Représentation de l'influence du système nerveux sympathique et parasympathique sur les différents organes du corps humain (Bear & Connors, 2016)

3.2.2 EDA

L'Activité électrodermale (EDA) désigne la variation des propriétés électriques de la peau en réponse à la sécrétion de la sueur par les glandes sudoripares eccrines (Dawson, Schell, & Fillion, 2000) influencée par l'activité du système nerveux sympathique. La base physiologique de l'EDA est une réaction autonome (involontaire) qui se produit dans la peau et le tissu sous-cutané en réponse à des changements d'émotions ("affects").

L'activité électrodermale peut être corrélée à l'excitation ; cette mesure peut aussi être utilisée pour évaluer les émotions (Boucsein, 2014) ainsi que la charge cognitive (Shi et al., 2007) au cours d'interactions avec des produits, systèmes ou services.

La mesure de l'EDA consiste à mesurer la conductivité de la peau, c'est-à-dire la vitesse à laquelle l'électricité peut passer d'un point à l'autre. Lorsque l'on sue, notre peau s'humidifie et conduit mieux l'électricité (Boucsein, 2014). Golding [24] a démontré que mesurer l'EDA sur le front du participant donne une meilleure estimation des changements dus au MdT. Dans notre cas, nous pouvons seulement le mesurer en utilisant des capteurs que nous plaçons dans la main gauche, ou droite si le participant était gaucher afin d'éviter qu'il ne bouge trop la main et que les senseurs s'enlèvent (Figure



Figure 8. Senseurs placés pour mesurer l'EDA

8).

3.2.3 ECG

L'électrocardiographie (ECG) correspond à l'activité électrique des muscles du cœur, et peut être utilisée pour inférer les processus affectifs et cognitifs (Ganglbauer, Schrammel, Deutsch, & Tscheligi, 2011). L'enregistrement ECG représente l'ensemble de l'activité

électrique des battements cardiaques et peut être décomposé en plusieurs éléments d'intérêt.

Par exemple, la fréquence cardiaque (HR), c'est-à-dire le nombre de fois où le cœur bat par minute, peut être utilisé pour inférer l'excitation, alors que la variation de la fréquence cardiaque (HRV), c'est-à-dire la variation de la durée entre chaque battement, peut être associée à des changements de niveau de charge mentale ou la valence émotionnelle (positive ou négative) (Haapalainen, Kim, Forlizzi, & Dey, 2010).

Dans le cadre de notre étude, nous allons utiliser les différentes fréquences de la HRV : les basses fréquences (LF), les hautes fréquences (HF) et le ratio LF/HF.

LF équivaut aux basses fréquences générées par le cœur (entre 0.03 et 0.15 Hz) correspondant à un mélange d'activité sympathique et parasympathique (Laborde, Mosley, & Thayer, 2017). Les HF correspondent aux hautes fréquences générées par le cœur (0.15-0.4 Hz) et sont un index du système parasympathique (Hufnagel, Chambres, & Auxiette, 2014; Wu & Lee, 2009). Plusieurs articles présentent également les HF comme un index d'autorégulation (Seegerstrom & Nes, 2007).

Le ratio LF/HF représente l'équilibre entre les systèmes sympathiques et parasympathiques. Il permet de mettre en évidence l'activation qui domine l'autre à un moment donné. Si la valeur augmente, on peut inférer la dominance du système sympathique tandis que si la valeur diminue, le parasympathique semble plus dominant, ce qui représente un effort de l'utilisateur visant à retrouver une situation homéostatique.