

Reconnaissance des changements comportementaux des
utilisateurs de réalité virtuelle à l'aide de capteurs de
mouvements et de capteurs physiologiques

par

Patrice ROBITAILLE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DES TECHNOLOGIES DE
L'INFORMATION
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 15 OCTOBRE 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Patrice Robitaille, 2018



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Michael J. McGuffin, directeur de mémoire
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. Sheldon Andrews, président du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. Vincent Lévesque, membre du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

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

LE 19 SEPTEMBRE 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Très jeune, j'ai eu accès à des consoles de jeux vidéo et un ordinateur. Je m'imaginai dans ces mondes virtuels et fantastiques avec toute l'imagination que je pouvais avoir à l'époque. Cette fascination pour l'univers virtuel combiné avec une curiosité sans cesse grandissante a fait en sorte que j'ai choisi de me spécialiser dans le domaine de l'informatique. Mais c'est durant mes études au baccalauréat en génie logiciel qu'une révélation m'est apparue. J'ai découvert la réalité virtuelle en ayant eu la chance de tester très tôt le tout premier prototype de casque de réalité virtuelle d'Oculus. Dès ce moment, j'ai décidé de comprendre le fonctionnement de cette technologie qui permet d'unir avec la réalité, les mondes virtuels et fantastiques que j'imaginai plus jeune.

J'ai alors compris le potentiel et l'impact qu'une telle technologie peut avoir dans l'avenir. J'ai donc fabriqué un casque de réalité virtuelle en carton afin d'effectuer mes premiers développements d'applications pour la réalité virtuelle. J'ai compris que certains concepts applicables à nos écrans traditionnels ne sont pas facilement transférables à la réalité virtuelle. En cherchant de l'information pour m'aider, j'ai découvert que le monde de la réalité virtuelle était très nouveau et que beaucoup de choses restent à découvrir. C'est à ce moment que j'ai décidé d'en faire une carrière en me spécialisant et en contribuant à la recherche en lien avec cette technologie.

Encouragé par une bourse d'excellence au baccalauréat et l'accès au financement grâce à mon directeur de recherche, j'ai pu démarrer mon projet de maîtrise en ayant comme but d'analyser les utilisateurs de réalité virtuelle et leurs mouvements, afin de détecter certains états émotionnels. C'est ainsi que j'ai commencé à découvrir véritablement le monde de la recherche scientifique et tous les défis que j'étais prêt à relever.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Michael J. McGuffin, de m'avoir fait confiance et d'avoir cru en mon potentiel pour réaliser ce projet. Son financement et le matériel fournis a non seulement pu rendre ce projet possible, mais son soutien, son aide pour la rédaction scientifique et ses commentaires constructifs ont largement contribué à ma motivation pour la recherche. Grâce à lui, j'ai pu expérimenter de nombreuses séances de réalité virtuelle et étendre mes connaissances sur le sujet bien au-delà de ce projet. Son réseau de contacts a aussi permis d'obtenir plusieurs réponses à nos questions.

Je veux également remercier David Labbé pour son encouragement, pour avoir pris le temps de répondre à mes nombreuses questions et pour m'avoir partagé des articles et des documents ayant contribué au succès de ce projet. Il m'a également beaucoup aidé à la réalisation de projets sur le sujet de la réalité virtuelle qui ont été précurseurs à ce travail de recherche.

Je remercie également mon ami Philippe Charbonneau pour le partage des connaissances et le partage de ces expériences en tant qu'étudiant-chercheur à l'ÉTS.

Je remercie également Sheldon Andrews pour avoir pris le temps de comprendre mon projet et d'avoir répondu à certaines de mes questions.

Je tiens également à remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour leur généreuse contribution financière. Cette aide m'a permis de me concentrer sur ce projet et de développer mes compétences en recherche.

Finalement, je remercie ma famille pour leur encouragement et leur influence positive. Par leur aide, leur éducation et leur soutien, j'ai pu accomplir tout le chemin vers l'accomplissement d'études aux cycles supérieurs.

Merci à tous pour votre soutien dans cette aventure.

RECONNAISSANCE DES CHANGEMENTS COMPORTEMENTAUX DES UTILISATEURS DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE À L'AIDE DE CAPTEURS DE MOUVEMENTS ET DE CAPTEURS PHYSIOLOGIQUES

Patrice ROBITAILLE

RÉSUMÉ

Les applications de réalité virtuelle offrent une grande variété d'expériences, suscitant une gamme de réponses émotionnelles. Certains changements dans les émotions de l'utilisateur pourraient être détectables en analysant simplement les mouvements de la tête et des mains, en utilisant les informations déjà disponibles avec les systèmes de réalité virtuelle standards. Une telle détection pourrait éventuellement permettre d'adapter et de personnaliser les expériences des utilisateurs. Cependant, il y a peu de travaux traitant de la détection d'états émotionnels en utilisant un système de réalité virtuelle ni de travaux détaillant la quantité d'information qu'il est possible d'extraire à partir des mouvements de la tête et des mains comparativement à d'autres systèmes de détection. Ce projet combine une plateforme de réalité virtuelle immersive avec des capteurs physiologiques mesurant l'activité cardiaque et l'activité électrodermale et étudie la possibilité d'utiliser les données de mouvements (tête, mains, bassin, pieds) avec et sans les données physiologiques, afin de classer différents comportements avec des algorithmes d'apprentissage machine. Deux expériences ont été réalisées dans ce projet. Dans la première, les participants ont réalisé 4 séances de réalité virtuelle associées à quatre conditions : (1) une condition de base avec une tâche d'observation où il est demandé de compter des éléments dans un environnement virtuel calme, (2) un jeu impliquant une activité motrice afin de déplacer des objets dans un environnement virtuel calme, (3) le même jeu, mais avec une limite de temps et différents stresseurs pour induire un comportement rapide et stressé, (4) le même jeu, mais après que les participants se soient familiarisés avec la tâche, toujours avec une limite de temps, mais sans stressors, pour induire un comportement rapide, mais confortable. Dans la deuxième expérience, les utilisateurs ont réalisé 4 autres séances de réalité virtuelle nécessitant de frapper des cibles mobiles. Une des quatre séances (dans un ordre balancé) correspond à une condition stressante (S), alors que les autres séances correspondent à une situation calme (C). Pour chaque expérience, dix algorithmes d'apprentissage machines ont été entraînés sur les données collectées et ont classés les différents comportements. Les résultats démontrent que seulement quelques secondes de données capturées sont suffisantes pour distinguer les conditions, avec plus de 74% de précision en utilisant l'ensemble des données des capteurs, et plus de 60% de précision en utilisant seulement les données provenant du mouvement du corps. Ce projet de recherche mesure ainsi l'importance des différentes caractéristiques de mouvements d'un utilisateur et quantifie la performance d'algorithmes d'apprentissage machine afin de reconnaître certains comportements lors d'une expérience de réalité virtuelle.

Mots-clés : Analyse des mouvements du corps, Apprentissage machine, Caractéristiques de mouvements, Comportement utilisateur, Environnement immersif, Réalité virtuelle

RECOGNITION OF BEHAVIORAL CHANGES OF VIRTUAL REALITY USERS USING MOTION SENSORS AND PHYSIOLOGICAL SENSORS

Patrice ROBITAILLE

ABSTRACT

Virtual reality (VR) applications offer a wide variety of experiences, eliciting a range of emotional responses. Certain changes in the user's emotions (affect) might be detectable by merely analyzing the movements of head and hands, using information already available from standard VR hardware. Such detection could eventually enable adapting and customizing user experiences. However, there is very little previous work on affect detection in immersive VR (i.e., using a head-mounted display), and it is unclear how much information can be gleaned from the motion of head and hands versus additional sensing modalities. We instrumented a state-of-the-art immersive VR platform with heart-rate and electrodermal activity sensors and investigated the feasibility of using movement data (of head, hands, pelvis, feet), with and without heart-rate and electrodermal activity sensor data, to classify different behaviors. We conducted two experiments. In the first one, users underwent four conditions in VR: (1) a baseline condition with a simple counting task in a calm environment, (2) a game involving a block-placement motor task in a calm environment, (3) the same game, but now with time limits and stressors designed to induce fast-and-stressed behavior, and (4) the same game but after users were familiar with the task, with time limits but without stressors, designed to induce fast-but-comfortable behavior. In the second experiment, users were asked to complete four blocks of tasks requiring them to hit moving targets. One of the four blocks (in counterbalanced order) corresponded to a stressful condition (S), while the others corresponded to a calm condition (C). For each experiment, ten machine learning algorithms were trained on the data. Our results show that just a few seconds of captured data are sufficient to distinguish all four conditions, with over 75% accuracy using all sensor data, and over 60% accuracy using only movement data. Our work quantifies the difference in accuracy that can be expected for different sensing modalities (head and hand movement versus full body movement versus additional physiological sensors). Our results provide guidance for future designers on the choice of classification algorithm and feature set.

Keywords : Body movement analysis, Immersive environments, Machine learning, Motion features, User behavior, Virtual reality

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1.1 Définition de la réalité virtuelle	5
1.2 Les débuts de la réalité virtuelle	6
1.3 Les visiocasques importants des cinq dernières années.....	9
1.3.1 Le Google Cardboard.....	9
1.3.2 Le GearVR de Samsung.....	10
1.3.3 L'Oculus Rift	10
1.3.4 Le HTC Vive.....	11
1.4 Le continuum de la virtualité	14
1.5 L'immersion.....	16
1.6 L'effet de présence.....	18
1.7 Les techniques de mesure de la présence.....	20
1.7.1 Les mesures subjectives.....	21
1.7.2 Les mesures comportementales	24
1.7.3 Les mesures physiologiques	26
1.8 Le « Flow » et le « GameFlow ».....	27
1.9 La réalité virtuelle et les émotions.....	30
1.10 Les mouvements du corps et les émotions.....	33
1.11 La proprioception, l'incarnation d'un avatar et la réalité virtuelle	37
CHAPITRE 2 Problématique.....	41
2.1 Complexité des données	41
2.2 Questions de recherche	42
CHAPITRE 3 Méthodologie.....	43
3.1 Équipements utilisés	43
3.2 Développement	48
3.2.1 L'environnement de développement de l'expérience	48
3.2.2 L'application de capture de données de mouvement.....	49
3.2.3 L'application d'analyse de données.....	50
3.2.4 La base de données	50
3.3 Participants.....	54
3.4 Design expérimental	54
3.5 Déroulement des expériences	56
3.5.1 Invitation et accueil des participants.....	56
3.5.2 Test de vision stéréoscopique	56
3.5.3 Installation des capteurs et du casque sur le participant	58
3.5.4 Initier le participant aux déplacements dans l'espace et calibration.....	60
3.5.5 Expérience #1.....	61
3.5.6 Expérience #2.....	71
3.6 Mesures.....	75

3.6.1	Les mesures de mouvements	75
3.6.2	Les mesures physiologiques	82
3.6.3	Les mesures subjectives.....	83
3.7	Comparaison des algorithmes de classification	84
3.7.1	Classification pour tous les participants	84
3.7.2	Utilisation de zones tampons pour l’entraînement des algorithmes	85
3.8	Évaluation de l’importance des mesures.....	87
CHAPITRE 4 RÉSULTATS		89
4.1	Résultats de l’expérience #1	89
4.1.1	Les résultats des mesures subjectives	89
4.1.2	Les résultats des mesures physiologiques.....	99
4.1.3	Classification des données par condition.....	110
4.1.4	Importances des caractéristiques dans la classification	113
4.1.5	Matrices de confusion et qualité de la classification	115
4.2	Résultats de l’expérience #2	119
4.2.1	Les résultats des mesures subjectives	119
4.2.2	Les résultats des mesures physiologiques.....	124
4.2.3	Classification des données par condition.....	125
4.2.4	Importances des caractéristiques dans la classification	129
4.2.5	Matrices de confusion et qualité de la classification	133
CHAPITRE 5 DISCUSSION		137
5.1	Questions de recherche	137
5.2	Classification des données	138
5.3	Limitation.....	139
5.4	Leçons apprises.....	141
5.5	Recommandations pour un concepteur.....	142
5.6	Directions futures.....	143
CONCLUSION		145
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		153

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Comparaison entre les visiocasques.....	13
Tableau 1.2 Facteurs influençant la présence (Witmer et Singer, 1998).....	22
Tableau 1.3 Sommaire des questionnaires évaluant la présence avec la réalité virtuelle.....	23
Tableau 1.4 Résumé des critères du GameFlow (Sweetser et Wyeth, 2005).....	29
Tableau 1.5 Les mouvements et postures accompagnant des émotions spécifiques.....	35
Tableau 3.1 Descriptions des tables de la base de données.....	53
Tableau 3.2 Ordre des différentes conditions pour chaque expérience.....	55
Tableau 3.3 Disparité des sections de la mouche en seconde d’arcs.....	57
Tableau 3.4 Paramètres des niveaux de difficulté de la tâche demandée.....	64
Tableau 3.5 Liste des évènements générés en fonction du temps restant pour accomplir la tâche.....	66
Tableau 3.6 Capteurs physiologiques et unités de mesure.....	83
Tableau 4.1 Moyennes (écarts-types) des réponses aux questionnaires sur l’analyse émotionnelle.....	92
Tableau 4.2 Moyennes (écarts-types) des réponses au questionnaire sur l’analyse de l’expérience #1.....	94
Tableau 4.3 Évaluation de l’effet de présence.....	97
Tableau 4.4 Évaluation du cybermalaise.....	98
Tableau 4.5 Rapport de classification en utilisant toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques).....	118
Tableau 4.6 Rapport de classification où seulement les données de mouvements ont été utilisées.....	118
Tableau 4.7 Rapport de classification où seulement les données de mouvements du haut du corps (tête + mains) ont été utilisées.....	119

Tableau 4.8 Moyenne (écarts-types) de l'évaluation des dimensions émotionnelles sur une échelle de 9 points.	120
Tableau 4.9 Moyennes (écarts-types) des réponses aux questionnaires sur l'analyse de l'expérience #2	120
Tableau 4.10 Moyennes (écarts-types) des réponses pour les 7 catégories de questions utilisées pour évaluer l'effet de présence à travers toutes les conditions.	123
Tableau 4.11 Moyennes (écarts-types) des réponses aux questionnaires évaluant le cybermalaise	124
Tableau 4.12 Moyennes (écarts-types) du rythme cardiaque et de l'activité électrodermale pour l'expérience #2.....	125
Tableau 4.13 Rapport de classification où toutes les données disponibles ont été utilisées..	135
Tableau 4.14 Rapport de classification où seulement les données de mouvements ont été utilisées	135
Tableau 4.15 Rapport de classification où seulement les données de mouvements du haut du corps (tête + mains) ont été utilisées	136

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Continuum de la virtualité (Milgram et Kishino, 1994).....	14
Figure 1.2 Le concept du Flow de Csikszentmihalyi appliqué aux jeux vidéo	28
Figure 1.3 Cycle entre les émotions, les interactions et les variables du jeu (Bura, 2008)	33
Figure 3.1 Émetteurs infrarouges inclus dans le système de réalité virtuelle HTC Vive	44
Figure 3.2 Exemple du système Chaperone permettant de limiter l'espace physique dans l'environnement virtuel à l'aide d'une grille	45
Figure 3.3 Capteurs de rythme cardiaque Polar H10	47
Figure 3.4 Le capteur Consensys GSR mesurant l'activité électrodermale.....	48
Figure 3.5 Présentation de l'application de capture de données.....	50
Figure 3.6 Aperçue du schéma de la base de données créé avec le logiciel MySQL Workbench.....	52
Figure 3.7 Le test de vision stéréoscopique Titmus.....	57
Figure 3.8 Un capteur Vive Tracker attaché correctement sur un soulier	59
Figure 3.9 Position des différents capteurs sur un participant	60
Figure 3.10 Représentation de l'environnement de la condition #1	62
Figure 3.11 Un participant lors de la deuxième condition.....	65
Figure 3.12 Présentation de l'environnement de la 3e condition sans élément stressant.	67
Figure 3.13 Présentation de l'environnement de la 3e condition avec éléments stressants	67
Figure 3.14 Mur laser lors du prototype	70
Figure 3.15 Exemple d'animation erronée d'un avatar	71
Figure 3.16 Un utilisateur lors de l'expérience #2, condition C.....	73
Figure 3.17 Un utilisateur lors de l'expérience #2, condition S.....	74

Figure 3.18 Représentation graphique de l'élévation et de l'azimut	77
Figure 3.19 Exemple de rayon de courbure sur d'une trajectoire de mouvement.	79
Figure 3.20 Exemples de mesure de la symétrie des mouvements.....	81
Figure 3.21 Exemple de volume de la boîte englobante.....	82
Figure 3.22 Échantillon testé trop près d'un échantillon ayant servi à l'entraînement.....	86
Figure 3.23 L'utilisation d'une zone tampon entre les données entraînées et ceux testées	87
Figure 4.1 Diagrammes en boîte à moustache pour les questions #1 à #5 du questionnaire d'analyse émotionnelle par condition	90
Figure 4.2 Diagrammes en boîte à moustache pour les questions #6 à #10 du questionnaire d'analyse émotionnelle par condition	91
Figure 4.3 Évolution du rythme cardiaque par condition pour chaque participant	100
Figure 4.4 Comparaison du rythme cardiaque moyen entre les conditions.....	101
Figure 4.5 Évolution du rythme cardiaque lors de la 3e condition.....	103
Figure 4.6 Comparaison du rythme cardiaque moyen entre les 3 parties de la condition 3 ..	104
Figure 4.7 Évolution de la conductance cutanée par condition pour chaque participant	105
Figure 4.8 Comparaison de la conductance cutanée moyenne entre les conditions	106
Figure 4.9 Évolution de la conductance cutanée pour lors de la 3 ^e condition	107
Figure 4.10 Comparaison de la conductance cutanée moyenne entre les 3 parties de la condition 3	108
Figure 4.11 Précision des algorithmes de classifications en incluant toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques)	110
Figure 4.12 Précision des algorithmes de classifications en incluant les données de mouvements seulement	111
Figure 4.13 Précision des algorithmes de classifications en incluant seulement les données de mouvements du haut du corps (tête + mains).....	112
Figure 4.14 Importance des 20 caractéristiques les plus influentes en incluant toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques)	113

Figure 4.15 Importance des 20 caractéristiques les plus influentes incluant seulement les données de mouvements.....	114
Figure 4.16 Matrices de confusion normalisées	116
Figure 4.17 Précision des algorithmes de classifications en incluant toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques)	126
Figure 4.18 Précision des algorithmes de classifications en incluant les données de mouvements seulement	127
Figure 4.19 Précision des algorithmes de classifications en incluant seulement les données de mouvements du haut du corps (tête + mains).....	128
Figure 4.20 Importance des 20 caractéristiques les plus influentes toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques)	130
Figure 4.21 Importance des 20 caractéristiques les plus influentes incluant seulement les données de mouvements.....	131
Figure 4.22 Importance des 20 caractéristiques les plus influentes incluant seulement les données de mouvements provenant du haut du corps	132
Figure 4.23 Matrices de confusion normalisée	134

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Ang	Angulaire, dans le cadre d'une mesure relative aux angles
CSV	Comma-Separated Values, un type de fichier de données
DK1	Development Kit 1, le nom du premier prototype Oculus Rift
DK2	Development Kit 2, le nom du deuxième prototype Oculus Rift
EDA	Electrodermal activity, activité électrodermale
EEG	Électroencéphalographie
HMD	Head-mounted display, casque de réalité virtuelle
LC	Left Controller, la manette de la main gauche
LCD	Liquid-Crystal Display, écran à cristaux liquides
LF	Left foot, le pied gauche de l'utilisateur
M	Moyenne
MLP	MultiLayer Perceptron
OLED	Organic Light-Emitting diode, diode électroluminescente organique
Pelv	Pelvis, le bassin de l'utilisateur
RC	Right Controller, la manette de la main droite
RF	Right Foot, le pied droit de l'utilisateur
Rel	Relative, dans le cadre d'une mesure relative à un point donné
RNN	Reccurent Neural Net
SAM	Self-Assessment Manikin, le nom d'un questionnaire psychologique
SD	Standard Deviation, écart-type

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

"	Secondes d'arc, une sous-unité du degré, soit la mesure d'angle
Δ	Delta, exprime une différence
bpm	Battement par minute
g	Gramme
Hz	Hertz
k Ω	Kiloohm
mm	Millimètre
m/s	Mètre par seconde
ms	Milliseconde
p	P-value
rad/s	Radian par seconde
s	Seconde
T	Temps
uS	Microsiemens

INTRODUCTION

L'humain dispose d'une large panoplie de moyens de communication non verbaux à travers les gestes, les manifestations du corps et les expressions faciales. Cette forme de communication, consciente ou inconsciente, peut faire passer un message et fournir de l'information à propos de la personne qui émet ce type de signaux. Elle permet entre autres de partager ses états d'âme, son inconfort, son intérêt et son ouverture. La volonté d'identifier et de reconnaître les émotions humaines en exploitant ces messages issus de la communication non verbale fait partie des objectifs de l'informatique affective. Un système capable de reconnaître les émotions pourrait offrir de nouvelles méthodes d'interaction entre les humains et les machines et même permettre à une application de s'adapter en conséquence. Plusieurs travaux utilisent la voix, les expressions faciales, les mouvements des yeux et d'autres données physiologiques tels que l'activité cérébrale, l'activité cardiaque et l'activité électrodermale afin de détecter certains états émotionnels.

L'émergence des systèmes de réalité virtuelle de haute qualité associés à un faible coût permet d'offrir de nouvelles opportunités pour l'informatique affective. Cette technologie permet d'obtenir le sentiment qu'un environnement entièrement généré par ordinateur puisse paraître réel, dans lequel il est même possible d'interagir. La réalité virtuelle peut reproduire artificiellement une expérience sensorielle, qui peut inclure la vue, le toucher, l'ouïe et l'odorat. Les systèmes de réalité virtuelle permettent de capturer de façon précise des données spatio-temporelles sur les mouvements de la tête des utilisateurs. Certains systèmes peuvent également capturer le mouvement des mains et d'autres parties du corps comme le bassin et les pieds. Ces systèmes utilisent ces informations afin d'adapter le contenu visuel de l'utilisateur en conséquence et d'offrir de nouvelles techniques d'interaction. Cependant, de telles informations peuvent également servir à analyser et à détecter certains états émotionnels chez les utilisateurs.

Les expériences de réalité virtuelle sont caractérisées par un sentiment de présence ressenti par l'utilisateur. L'effet de présence peut se résumer à la sensation « d'être là », c'est-à-dire de se

sentir psychologiquement présent dans l'environnement virtuel. Un environnement virtuel qui produit un sentiment de présence est capable de susciter des réactions émotionnelles et des changements de comportement. Par exemple, si une balle virtuelle est lancée vers la tête d'un utilisateur, celui-ci va avoir le réflexe de l'attraper ou de l'éviter. Ainsi, en combinant la possibilité d'induire volontairement des réactions émotionnelles chez les utilisateurs et la possibilité d'analyser ces réactions à l'aide des données capturées, il est raisonnable de croire qu'on pourrait voir apparaître des systèmes ayant les capacités de reconnaître, d'exprimer, de synthétiser et de modéliser les émotions humaines.

Une des utilisations principales des plateformes de réalité virtuelle est la simulation de scénarios qui peuvent être parfois stressants, comme des batailles militaires, des entraînements en situation d'urgences et des jeux vidéo. Lorsqu'un utilisateur se retrouve dans une situation de stress, il peut y avoir une surcharge cognitive et être moins apte à informer explicitement le système sur les actions qu'il souhaite effectuer avec les techniques d'interaction traditionnelles. Une détection automatique du stress de l'utilisateur pourrait être utile pour : (1) mesurer comment un utilisateur répond à un scénario précis, (2) offrir automatiquement de l'aide sans l'intervention de l'utilisateur, (3) ajuster la difficulté de la simulation afin d'éviter l'ennui ou la frustration de l'utilisateur, et (4) évaluer la performance de l'expérience utilisateur comme complément à d'autres métriques comme le temps pour effectuer une tâche, le ratio d'erreurs ou les évaluations subjectives.

Ce projet évalue la possibilité d'analyser les données de mouvements et les données physiologiques d'un participant afin de détecter des changements dans le comportement sous différentes conditions. Des travaux antérieurs ont tenté de détecter des états émotionnels à travers différents moyens comme l'analyse des expressions faciales (De Silva *et al.*, 1997) et l'analyse de signaux physiologiques (Drachen *et al.*, 2010 ; Nacke *et al.*, 2011 ; Nacke, 2009). Plusieurs survols existent sur le domaine de l'informatique affective (Calvo et D'Mello, 2010 ; Gunes et Pantic, 2010 ; Gunes, Piccardi et Pantic, 2008 ; Zeng *et al.*, 2009).

Pour notre expérience, chacune des conditions a été évaluée par ces mêmes participants afin de les différencier au niveau du stress et de l'effet de surprise générés. Pour ce faire, les participants ont effectué des séances de réalités virtuelles associées aux différentes conditions équipés des capteurs afin d'enregistrer leurs mouvements, leur activité cardiaque et leur activité électrodermale. Les données récoltées ont ensuite été utilisées pour entraîner des algorithmes d'apprentissage machine afin qu'ils puissent reconnaître les différentes conditions associées à des niveaux de stress différents et donc à des comportements différents. Une des conditions demande aux participants d'effectuer une tâche à l'intérieur d'un temps limite, nécessitant ainsi qu'ils effectuent des mouvements rapides avec leur corps tout en étant sujet à des éléments stressants inattendus. Dans une autre condition, les participants doivent accomplir la même tâche avec la même contrainte de temps, nécessitant qu'ils bougent encore rapidement, mais sans élément stressant, leur permettant de se concentrer sur la tâche et d'être plus efficaces. Ce projet compare 10 algorithmes d'apprentissage machine en mesurant leur précision au niveau de la classification des conditions. Les résultats quantifient la différence des performances avec et sans données physiologiques, de même que la différence des performances avec et sans les données de mouvement provenant de la partie inférieure du corps. De plus, différentes évaluations ont été réalisées afin de comparer l'efficacité des algorithmes en variant l'intervalle de temps utilisé pour chaque échantillon de données collecté. Ces algorithmes peuvent atteindre jusqu'à 74% de précision en utilisant l'ensemble des données des capteurs, et plus de 60% de précision en utilisant seulement les données provenant du mouvement du corps.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Définition de la réalité virtuelle

L'expression « réalité virtuelle » est issue de la combinaison de deux termes qui peuvent sembler être contradictoires. Cette contradiction reflète bien le fait qu'avec cette technologie, il est possible d'obtenir le sentiment qu'un environnement virtuel puisse paraître réel. L'expression provient de l'anglais. Plusieurs personnes utilisaient le terme « virtual » pour décrire des éléments virtuels : « virtual worlds », « virtual cockpits » et « virtual workstations » en sont des exemples. Mais Jaron Lanier semble être celui qui a combiné le terme « virtual » et « reality » pour la première fois en 1989 (Steuer, 1992). Il a d'ailleurs donné sa définition de la réalité virtuelle lors d'une entrevue pour le magazine *Whole Earth Review* :

« Virtual reality [...] recreates our relationship with the physical world in a new plane, no more, no less. [...] It will use your body's movement to control whatever body you choose to have in Virtual Reality, which might be human or be something different. » (Kelly, Heilbrun et Stacks, 1989)

Plusieurs autres chercheurs ont plutôt défini la réalité virtuelle comme une extension des graphiques 3D rendus par ordinateurs, permettant à l'utilisateur de se sentir immergé dans l'environnement virtuel qui l'entoure.

« Virtual reality is a fully three-dimensional computer-generated "world" in which a person can move about and interact as if he actually were in this imaginary place. This is accomplished by totally immersing the person's senses in the "world" using a head-mounted display (HMD) [...] » (Satava, 1993)

« Virtual reality (VR) is defined as the use of computer-generated virtual environments and the associated hardware to provide the user with the illusion of physical presence within that environment. » (Jayaram, Connacher et Lyons, 1997)

« Virtual reality is a computer-generated illusion of a data space in which the user has a virtual presence. » (Mercurio *et al.*, 1990)

La définition donnée par Satava sera celle utilisée dans ce projet.

1.2 Les débuts de la réalité virtuelle

La représentation du monde en trois dimensions se fait depuis plusieurs siècles grâce à des techniques artistiques permettant de simuler des effets de profondeur dans les peintures tels que l'utilisation d'ombres, de textures, de points de fuites et de variations dans la taille des objets. Cependant, c'est le physicien britannique Charles Wheatstone qui serait à l'origine du premier système binoculaire avec l'invention du stéréoscope dans les années 1830 (Wade et Ono, 2012 ; Finn et Bowers, 2003). Cet appareil fut l'un des premiers à exploiter la disparité entre les deux yeux, afin de percevoir un effet de profondeur plus convaincant dans des images.

Mais c'est l'invention de Morton Heilig qui a permis d'expérimenter les premières séances immersives dans un environnement virtuel avec l'invention du Sensorama, dans les années 1950 (Heilig, 1962). Cette machine ayant la taille d'une arcade permettait à une personne de s'asseoir devant un écran stéréoscopique possédant plusieurs simulateurs sensoriels, tel qu'un ventilateur pour créer un effet de vent, un système de vibrations, un générateur d'odeurs et des haut-parleurs. Le Sensorama permettait ainsi de se sentir présent à travers le film d'un motocycliste se promenant à travers Brooklyn. Cependant, aucune interaction n'était possible dans ce film et le projet fut abandonné faute de financement (Boas, 2013).

Le premier visiocasque, nommé Headsight, a été développé par Charles Comeau et James Bryan, deux ingénieurs chez Philco Corporation en 1961 (Flynn, 2014). Contrairement au Sensorama et au stéréoscope, ce casque n'offrait pas un affichage stéréoscopique. Il avait plutôt la particularité d'avoir un système de suivi magnétique lié à une caméra à distance, permettant d'ajuster l'orientation de cette caméra en fonction du mouvement de la tête de l'utilisateur et

d'afficher l'image dans le casque. Ce projet était développé dans le but d'effectuer de la surveillance par caméra.

C'est cependant Ivan Sutherland qui a eu la vision très proche de ce que la réalité virtuelle peut offrir aujourd'hui. Dans un article qu'il a écrit en 1965, on peut y lire sa définition de ce que serait selon lui, le système d'affichage ultime :

“The ultimate display would, of course, be a room within which the computer can control the existence of matter. A chair displayed in such a room would be good enough to sit in. Handcuffs displayed in such a room would be confining, and a bullet displayed in such a room would be fatal. With appropriate programming such a display could literally be the Wonderland into which Alice walked.” (Sutherland, 1965)

S'il n'est toujours pas possible de contrôler la matière avec la réalité virtuelle, certains systèmes haptiques permettent de recréer des sensations similaires. En plus d'avoir une vision semblable à ce qu'on peut vivre avec la réalité virtuelle aujourd'hui, Sutherland a créé le système « Sword of Damocles », incluant un visiocasque intégré avec un système de suivi de la tête mécanique et rétractable suspendu par des câbles au plafond. Connecté à un ordinateur, ce système permettait d'afficher de façon stéréoscopique des représentations graphiques primitives selon la position de l'utilisateur (Boas, 2013).

Mais c'est vers la fin des années 1980 que la réalité virtuelle a véritablement commencé à naître. C'est d'ailleurs à cette période que les premiers articles utilisant le terme « réalité virtuelle » ont commencé à être publiés (Mercurio *et al.*, 1990 ; Blanchard *et al.*, 1990). Jaron Lanier créa en 1985 VPL Research, qui a largement contribué à la naissance de la réalité virtuelle. En effet, Lanier et d'autres collègues ont créé un premier dispositif permettant d'interagir plus fidèlement avec l'environnement virtuel, nommé le DataGlove (Zimmerman *et al.*, 1987). Le DataGlove était un gant de faible poids connecté à un ordinateur, permettant de reproduire en temps réel les positions et orientations de la main de l'utilisateur avec six degrés de liberté tout en mesurant la flexion des doigts. Ce système permettait de manipuler des objets dans un environnement 3D primitif. Lanier a aussi travaillé à développer un casque de réalité virtuelle en créant le EyePhone (Teitel, 1990), un visiocasque incluant des écrans

LCD en couleur. Le EyePhone et le DataGlove ont été les premiers produits de réalité virtuelle à pouvoir être vendus au grand public (environ 9000\$US).

Par la suite, l'industrie du jeu vidéo s'empara de l'idée d'offrir des systèmes de réalité virtuelle à leurs clients. Sega développa le « Sega VR Headset » en 1993 et Nintendo développa le « Virtual Boy » en 1995. Si ces systèmes étaient offerts à faible coût (environ 200\$US), la qualité de l'image et la fidélité graphique n'était pas au rendez-vous. De plus, le faible nombre de jeux compatibles et les nombreux problèmes techniques en firent des échecs catastrophiques pour les deux entreprises.

C'est en 2012 qu'une importante campagne de sociofinancement récolte plus de 2.5 millions de dollars afin de financer le développement d'un visiocasque, maintenant très populaire, le Oculus Rift. En 2014, Facebook acheta l'entreprise Oculus et contribua ainsi fortement au développement du produit en y investissant plusieurs millions de dollars. Suivant ces annonces, des dizaines d'entreprises se mirent alors à développer leur propre visiocasque, dont des entreprises importantes dans le domaine de l'électronique, telles que Samsung, HTC et Sony. L'explosion du financement dans la réalité virtuelle, combiné à la puissance actuelle des ordinateurs, permettant de générer des mondes virtuels avec un haut degré de réalisme, a permis de vendre à nouveau des visiocasques (environ 600\$US) au grand public à partir de janvier 2016.

L'histoire de la réalité virtuelle reflète bien l'évolution de la technologie au fil des dernières années. Possédant maintenant des écrans ayant de meilleures résolutions, intégrant de nouveaux capteurs plus précis et accompagnés d'ordinateurs ayant une puissance de calculs toujours plus grande, les casques de réalité virtuelle permettent de simuler des scénarios avec un haut degré de réalisme, au point où certains chercheurs se demandent jusqu'à quel degré un environnement virtuel doit être réaliste pour être efficace (Bowman et McMahan, 2007 ; Lugin *et al.*, 2015).

La prochaine section détaillera le fonctionnement des visiocasques les plus importants des cinq dernières années et décrira les raisons pour lesquelles le casque HTC Vive a été sélectionné pour les fins de l'expérience.

1.3 Les visiocasques importants des cinq dernières années

Les visiocasques présentés ici sont ceux qui ont été évalués au début des travaux en 2016.

1.3.1 Le Google Cardboard

Le visiocasque Google Cardboard (Coz *et al.*, 2016) est disponible depuis l'été 2014. C'est le casque de réalité virtuelle le moins dispendieux, accessible pour une vingtaine de dollars. Son prix est justifié par les matériaux utilisés. En effet, le Google Cardboard est en fait un masque de carton à monter soi-même dans lequel on doit insérer un téléphone intelligent compatible avec celui-ci. Le téléphone est placé de sorte que chaque œil peut percevoir chacun une moitié de l'écran du téléphone. Au niveau logiciel, l'écran du téléphone est divisé en deux afin d'afficher une image différente pour chaque œil. Un autre avantage de ce visiocasque est qu'il est mobile, sans être lié par des câbles à un autre dispositif. Il permet donc de faire des prototypes et expériences à faible coût afin de tester différents scénarios avec la réalité virtuelle (Yang *et al.*, 2015 ; Lindeman, 2016).

Cependant, le nombre d'interactions possibles avec ce casque est limité. En effet, puisque le téléphone est inséré dans le masque, il n'est pas possible d'interagir directement avec celui-ci. Il y a tout de même un aimant sur le Cardboard pouvant être actionné, générant un champ magnétique sur l'écran du téléphone, simulant ainsi l'action de toucher l'écran avec son doigt. L'autre particularité est que le casque doit être maintenu par une ou deux mains afin de le maintenir en place sur le visage, car celui-ci ne possède pas de dispositif permettant d'attacher le casque sur la tête de l'utilisateur. Ainsi, puisque les mains ne sont pas disponibles, il est impossible pour l'utilisateur d'utiliser un contrôleur externe ou une télécommande afin d'interagir avec les applications. Néanmoins, il existe plusieurs techniques d'interaction possible avec ce casque comme l'orientation du regard ou les mouvements de la tête (Yoo et Parker, 2015 ; Powell *et al.*, 2016 ; Shimizu et Chernyshov, 2016). D'autres vont même jusqu'à intégrer le système de détection des mains Leap Motion afin d'ajouter un niveau d'interaction avec les applications (Chifor et Stefanut, 2015).

1.3.2 Le GearVR de Samsung

Le visiocasque GearVR de Samsung (Kim, Bang et Kim, 2016) n'est pas très différent du Google Cardboard. Disponible depuis la fin 2015, ce casque coûte environ 100\$, ce qui en fait un des casques à faible coût. Cependant, il nécessite l'utilisation d'un des récents téléphones intelligents de Samsung compatibles qui va agir comme écran et processeur traitant l'information et hébergeant les applications. Le GearVR est plus robuste que le Cardboard avec sa finition en plastique et possède des lentilles ajustables de meilleure qualité. De la même façon que le Cardboard, le téléphone intelligent est inséré dans le casque de façon à ce que chaque œil voie une moitié de l'écran afin de profiter de la disparité entre les deux yeux pour obtenir un effet de profondeur. Le GearVR possède un capteur inertiel interne calibré et plus précis que ceux déjà existants dans les téléphones intelligents afin de détecter les rotations de la tête. Il peut même être utilisé afin de détecter des patrons de déplacement de l'utilisateur (Pfeiffer, Schmidt et Renner, 2016). Ce visiocasque est également mobile, ne possédant pas de fils pouvant nuire aux déplacements, tout en ayant pour seule dépendance le téléphone dans lequel il y est inséré.

Son avantage par rapport au Google Cardboard est que ce visiocasque permet d'être attaché sur la tête de l'utilisateur et ainsi de libérer ses deux mains. Ce casque possède également une zone tactile sur le côté afin de pouvoir faire plusieurs gestes de doigt ainsi qu'un bouton physique, permettant d'offrir plus d'interactions avec l'environnement virtuel. De plus, puisque les mains peuvent être libres, il est possible de lier via Bluetooth un contrôleur externe tel qu'une manette de jeux vidéo afin d'interagir avec les applications de réalité virtuelle. Il est donc un bon casque pour les applications professionnelles à faible coût (Bu *et al.*, 2015).

1.3.3 L'Oculus Rift

Le visiocasque Oculus Rift (Luckey *et al.*, 2014) est probablement celui qui a eu le plus d'influence en réanimant l'intérêt pour la réalité virtuelle dès la mise en place de sa campagne de sociofinancement sur la plateforme Kickstarter en 2012. Dès 2013, les chercheurs et les développeurs ont pu mettre la main sur un premier kit de développement (DK1) pour environ

300\$US. Contrairement au GearVR et au Google Cardboard, ce visiocasque n'est pas mobile et nécessite d'être connecté à une boîte de contrôle elle-même connectée à un ordinateur nécessitant des spécifications de performances élevées. Le DK1 intègre un écran LCD d'une résolution de 1280x800 (Desai *et al.*, 2014), un gyroscope, un accéléromètre et un magnétomètre afin de faire le suivi de l'orientation de la tête avec précision. En juin 2014, un deuxième kit de développement (DK2) fut disponible, améliorant la qualité de l'image grâce à un écran OLED d'une meilleure résolution (1920x1080) et l'ajout de capteur et d'une caméra infrarouge afin de permettre de faire le suivi de la position de la tête dans un petit espace, offrant ainsi 6 degrés de liberté pour le mouvement du casque. Enfin, une première version commerciale fut disponible au début de l'année 2016 pour environ 600\$US offrant un meilleur rafraîchissement de l'écran, une meilleure résolution et la possibilité de faire le suivi de la tête pour importe son orientation grâce à l'ajout de nouveaux capteurs infrarouges.

L'avantage de ce visiocasque par rapport à ceux utilisant des téléphones intelligents est que les applications et le traitement graphiques peuvent être plus complexes et plus réalistes grâce à la puissance fournie par l'ordinateur. De plus, le suivi de la position de la tête permet de réduire les sources pouvant provoquer un conflit vestibulo-visuel (Akiduki *et al.*, 2003). Il peut également être compatible avec tous les contrôleurs pouvant être supportés par l'ordinateur. La version commerciale est aussi livrée avec une manette de la console Xbox One.

1.3.4 Le HTC Vive

Le casque de réalité virtuelle HTC Vive est le fruit de la collaboration de deux entreprises, soit HTC, fabricant de produits électroniques notamment des téléphones mobiles et Valve, l'entreprise propriétaire de la plus importante plateforme de distribution de jeux (Steam) et également productrice de jeux vidéo. Le HTC Vive est disponible publiquement depuis avril 2016 pour un prix avoisinant les 800\$US. Tout comme le Oculus Rift, le Vive n'est pas un visiocasque mobile et il est lui aussi connecté à une boîte de contrôle elle-même connectée à un ordinateur nécessitant une très bonne configuration matérielle. Ce casque offre un champ de vision de 110 degrés avec un écran ayant une résolution de 2160x1200 pixels. Il intègre également différents capteurs, tels qu'un gyroscope, un accéléromètre et des capteurs de

position laser, afin de détecter la position et l'orientation du casque dans l'espace. Cependant, il possède en plus une caméra intégrée sur la face avant permettant de visualiser l'environnement extérieur sans enlever le casque et un microphone pour communiquer de façon électronique. C'est sans compter la prise audio jack pour y brancher des écouteurs.

Il possède donc les mêmes avantages que l'Oculus Rift par rapport aux modèles mobiles qui reposent principalement sur la puissance des téléphones. Mais en plus de permettre un meilleur traitement graphique, ce casque a l'avantage d'être accompagné de deux émetteurs infrarouges permettant de faire le suivre le casque dans une pièce entière, offrant la possibilité à l'utilisateur de se déplacer physiquement dans le monde réel et virtuel. De plus, deux manettes sans fil intégrant aussi un gyroscope, un accéléromètre et des capteurs de position laser permettent de simuler des mains virtuelles, donnant ainsi la possibilité d'obtenir des interactions hommes-machines intéressantes.

Ce sont les émetteurs infrarouges et la possibilité de se déplacer dans une pièce avec deux manettes qui ont justifié le choix de ce visiocasque pour la présente étude.

Tableau 1.1 Comparaison entre les visiocasques

Google Cardboard**Samsung GearVR****Oculus Rift****HTC Vive**

Type d'écrans	Selon le téléphone utilisé	Selon le téléphone utilisé	PenTile OLED	PenTile OLED
Résolution d'écrans	Selon le téléphone utilisé	Selon le téléphone utilisé	2160 x 1200	2160 x 1200
Rafraîchissement de l'écran	Selon le téléphone utilisé	Selon le téléphone utilisé	90 Hz	90 Hz
Champs de vision	90 degrés	96 degrés	110 degrés	110 degrés
Audio	Écouteurs	Écouteurs	Écouteurs et microphone	Écouteurs et microphone
Contrôleurs externes	Aucun	Manette Bluetooth possible	Manette Xbox One	Deux manettes intégrant gyroscope, accéléromètre et capteurs de position laser
Capteurs	Accéléromètre, Gyroscope, Magnétomètre	Accéléromètre, Gyroscope, Magnétomètre	Accéléromètre, Gyroscope, Magnétomètre, Système de suivi externe	Accéléromètre, Gyroscope, Émetteurs et capteurs infrarouges, Caméra frontale
Degrés de libertés	3 (orientation seulement)	3 (orientation seulement)	6 (orientation + position dans un petit espace 1m x 1m)	6 (orientation + position dans une pièce 10m x 10m)
Coût (janvier 2017)	20\$US	100\$US	600\$US	800\$US

1.4 Le continuum de la virtualité

Si l'expression « réalité virtuelle » possède le terme réalité, il faut admettre que la portion des éléments virtuels est beaucoup plus importante que les éléments réels. C'est que la réalité virtuelle est complètement à l'extrémité du continuum de la virtualité, tel que défini par Milgram et Kishino en 1994. Le continuum de la virtualité consiste à ordonner les différents types de réalité, selon le degré de stimulus généré par ordinateur, en partant de l'environnement réel, puis la réalité augmentée, la virtualité augmentée et enfin la réalité virtuelle (Milgram et Kishino, 1994 ; Nijholt et Traum, 2005).

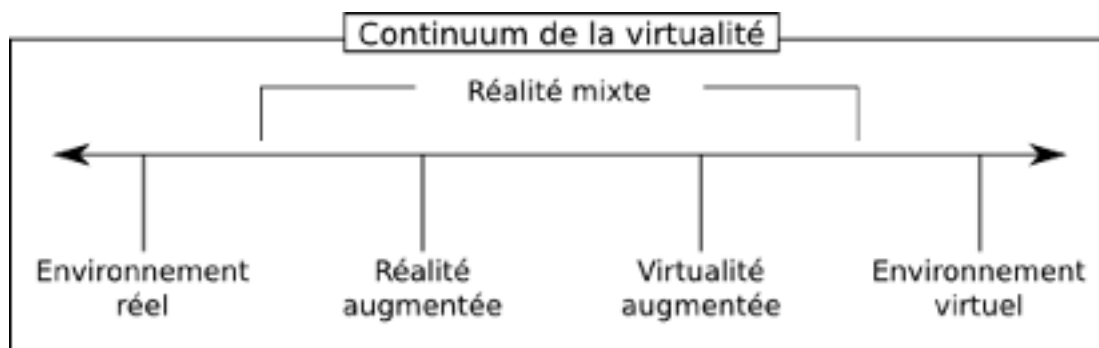


Figure 1.1 Continuum de la virtualité (Milgram et Kishino, 1994)

L'environnement réel représente l'environnement dans lequel on se trouve tous les jours, où nous manipulons physiquement de vrais objets et où l'on peut les observer sans utiliser de système d'affichage électronique particulier. Il est bien important de comprendre les différentes formes d'interactions que nous avons avec le monde réel afin de bien pouvoir répliquer ces interactions dans le reste du continuum de la virtualité, et ainsi profiter de l'intuitivité de celles-ci. La manipulation du clavier et d'une souris entre dans cette catégorie, de même que les autres techniques d'interaction où l'on manipule des objets physiques, telle que la manipulation d'une tête de poupée afin de visualiser différente partie d'un cerveau sur un écran 2D (présentant des données virtuelles) (Hinckley *et al.*, 1994).

La réalité augmentée permet à l'utilisateur de percevoir l'environnement réel, mais en y superposant des éléments virtuels, de façon à coexister dans le même espace. Selon Azuma, la

réalité augmentée doit être composée de 3 caractéristiques : elle doit combiner l'environnement réel avec des éléments virtuels, elle doit être interactive en temps réel et doit pouvoir aligner des objets virtuels et réels entre eux dans l'espace (Azuma, 1997 ; Azuma *et al.*, 2001). Il existe deux formes de réalité augmentée : la réalité augmentée spatiale et la réalité augmentée « à travers ». Dans la réalité augmentée spatiale, l'environnement physique de l'utilisateur est augmenté directement dans son environnement (Raskar, Welch et Fuchs, 1998). Un exemple est la projection d'image sur des objets réels à l'aide d'un projecteur. Les hologrammes sont également une autre forme de réalité augmentée spatiale. La réalité augmentée « à travers » se fait à l'aide d'affichage optique tel qu'un visiocasque, d'un téléphone mobile ou de lunettes, possédant toutes une caméra. Dans ce cas-ci, l'utilisateur doit utiliser un écran affichant le contenu capté par la caméra afin d'y voir les éléments virtuels ajoutés. Ces éléments sont donc visibles seulement dans le dispositif d'affichages.

La virtualité augmentée est l'inverse de la réalité augmentée. Cela consiste plutôt à utiliser un environnement virtuel afin d'y ajouter des éléments de l'environnement réel. L'environnement virtuel est prédominant et les éléments physiques ajoutés, par exemple des objets ou des personnes, sont dynamiquement intégrés dans le monde virtuel en temps réel. Les éléments ajoutés peuvent être en 2D, par exemple, le flux vidéo d'une caméra, ou en 3D, comme l'ajout d'une personne.

« Augmented virtuality refers to virtual environments which have been enhanced or augmented by inclusion of real world images or sensations. Augmented virtuality differs from augmented reality (another form of mixed reality) because the basis of augmented virtuality is that the environment is virtual as opposed to real. » (Nielsen, 2006)

À l'extrémité du continuum de la virtualité, l'environnement virtuel se définit comme étant créé de toute pièce par ordinateur, sans intégrer de contenu de l'environnement réel. Lorsqu'on mentionne la réalité virtuelle, on fait généralement référence à cette catégorie du continuum de la virtualité. L'un des objectifs de l'environnement virtuel est de faire en sorte qu'il soit complètement immergé dans un autre monde, de façon à ce que l'environnement réel soit oublié (Jerald, 2015).

1.5 L'immersion

L'immersion est un concept qui peut s'appliquer à plusieurs formes de divertissements, tels que la lecture d'un roman, le visionnement d'un film, d'une session de jeu vidéo ou de réalité virtuelle. Cependant, il ne semble pas avoir de définition officielle acceptée par la communauté scientifique et certains articles confondent le terme « immersion » avec le terme « présence ». Depuis la popularisation des expériences de réalité virtuelle avec la multiplication des casques dans les dernières années, le terme immersion est devenu un mot à la mode souvent employé incorrectement pour décrire en fait l'effet de présence.

L'immersion est en fait un concept composé de plusieurs degrés qu'un système de réalité virtuelle peut obtenir. Selon Slater et Wilbur, l'immersion est la propriété d'une technologie qui décrit à quel point elle peut délivrer une expérience inclusive, étendue, environnante tout en offrant une illusion vive d'une réalité aux différents sens d'un participant humain (Slater et Wilbur, 1997).

« Immersion is a description of a technology, and describes the extent to which the computer displays are capable of delivering an inclusive, extensive, surrounding and vivid illusion of reality to the senses of a human participant. » (Slater et Wilbur, 1997).

Lorsque les auteurs ont présenté cette définition, ils ont pris soin de préciser certains termes importants qu'ils ont utilisés. Le fait qu'une technologie offrant de l'immersion peut être « inclusive » fait référence au fait qu'un utilisateur peut être isolé de son environnement extérieur, soit de l'environnement réel tel que défini dans le continuum de la virtualité. L'immersion d'un système de réalité virtuelle est « étendue » dans le sens qu'il peut stimuler plusieurs sens à différents niveaux. Puis, ils décrivent qu'une immersion « environnante » nécessite que l'environnement virtuel entoure complètement l'utilisateur, qui n'offre pas une vue étroite d'une scène comme le fait une télévision. Enfin, ils décrivent qu'une « illusion vive » offerte par la technologie est représentée par sa résolution, sa fidélité, la variété et la richesse de l'information perçues par les utilisateurs.

D'autres chercheurs s'entendent également pour dire que l'immersion est une caractéristique technologique qui fournit de l'information multisensorielle tout en restant fidèle avec la représentation d'équivalences du monde réel (Slater *et al.*, 2009).

Cependant, tous ne définissent pas l'immersion de la même façon. Des études définissent l'immersion de la même façon qu'est défini l'effet de présence dans d'autres études. Ainsi, l'équipe de Patrick décrit l'immersion comme étant une mesure à laquelle le système cognitif et les perceptions d'une personne peuvent être trompés en leur faisant croire qu'ils sont dans un autre endroit que leur emplacement physique réel (Patrick *et al.*, 2000).

Dans le même sens, Murray présente une métaphore intéressante de l'immersion lorsqu'il définit ce concept comme un terme dérivé de l'expérience physique lorsqu'on est immergé dans l'eau :

« Immersion is a metaphorical term derived from the physical experience of being submerged in water. We seek the same feeling from a psychologically immersive experience that we do from a plunge in the ocean or swimming pool: the sensation of being surrounded by a completely other reality, as different as water is from air, that takes over all of our attention, our whole perceptual apparatus. » (Murray, 1997)

Witmer et Singer ont également donné une définition de l'immersion comme étant un état psychologique caractérisé par la perception de soi-même d'être enveloppé, inclus et interagissant avec un environnement fournissant un flux continu de stimuli et d'expériences (Witmer et Singer, 1998).

Le concept de l'immersion existait bien avant la démocratisation de la réalité virtuelle. C'est plutôt l'industrie du jeu vidéo qui a poussé plusieurs chercheurs à comprendre la façon à laquelle les joueurs pouvaient s'engager et être immergé dans leur jeu. Ainsi, Brown et Cairns ont tenté d'expliquer le phénomène de l'immersion en découpant ce concept en 3 niveaux : l'engagement, l'absorption et l'immersion totale (Brown et Cairns, 2004). Le premier niveau est l'engagement qui peut être atteint seulement lorsqu'un utilisateur décide d'investir volontairement du temps, de l'effort et de l'attention pour apprendre et vivre son expérience.

Le deuxième niveau est l'absorption et l'utilisateur doit pouvoir être affecté émotionnellement par l'expérience et doit pouvoir interagir intuitivement avec l'expérience, sans avoir à se concentrer pour effectuer ces interactions, afin d'atteindre ce niveau. Enfin, l'immersion totale est le dernier niveau où l'effet de présence se fait ressentir. C'est lorsque l'utilisateur est coupé de la réalité et qu'il porte pleinement son attention sur l'expérience virtuelle.

La définition de l'immersion utilisée dans le cadre de ce projet de recherche est celle décrite par Slater et Wilber. Le terme présence sera plutôt utilisé pour décrire l'aspect subjectif de l'expérience et du sentiment psychologique d'être immergé dans un autre environnement.

1.6 L'effet de présence

L'effet de présence est un concept qui est souvent confondu avec celui de l'immersion. Plusieurs auteurs décrivent l'effet de présence comme étant l'immersion. C'est que l'effet de présence dépend autant de l'utilisateur que de l'immersion offerte par la technologie. Plus le système permet d'offrir une immersion importante, plus l'effet de présence peut se faire ressentir dans l'environnement virtuel (Jerald, 2015). Bien qu'il soit difficile de dissocier les deux, cette section va préciser davantage ce qu'est l'effet de présence.

Il est possible de lire dans de nombreux articles et livres que l'effet de présence peut se résumer à la sensation « d'être là », de se sentir psychologiquement présent dans l'environnement virtuel (Slater, Usoh et Steed, 1994). Mais c'est en 2000 qu'un groupe d'expert s'est réuni pour définir le terme présence, dans le contexte de la réalité virtuelle, de cette façon :

« Presence is a psychological state or subjective perception in which even though part or all of an individual's current experience is generated by and/or filtered through human-made technology, part or all of the individual's perception fails to accurately acknowledge the role of the technology in the experience » (International Society for Presence Research, 2000)

Witmer et Singer étaient proches de cette définition lorsqu'ils ont décrit en 1998 la présence comme étant « une expérience subjective d'être à un endroit ou dans un environnement, alors

qu'on est situé physiquement dans un autre endroit ». Pour la réalité virtuelle, cela signifie que l'effet de présence peut faire croire à des personnes qu'ils se trouvent dans un environnement entièrement créé par l'ordinateur (Witmer et Singer, 1998). D'un point de vue cognitif, ces personnes peuvent très bien savoir qu'il n'y a d'objets près d'eux dans leur environnement physique, mais en voyant des objets qui leur sont affichés dans un visiocasque de réalité virtuelle, ils vont répondre consciemment et inconsciemment de la même façon que si ces objets étaient réellement présents, par exemple, en tentant de les toucher ou de les éviter. C'est le paradoxe du concept de la présence défini par Sanchez-Vives et Slater (Sanchez-Vives et Slater, 2005).

L'effet de présence est en fait un élément recherché lors d'une expérience de réalité virtuelle. Un participant ayant un haut degré de présence sera plus engagé dans l'environnement virtuel et va considérer qu'il aura visité cet endroit plutôt que d'avoir observé une série d'images ou un vidéo. Ainsi, il y a très peu d'intérêt à utiliser la réalité virtuelle si la présence est absente de l'expérience. Par exemple, l'utilisation d'un programme ou d'une application en réalité virtuelle n'aurait aucune utilité si ce programme n'induit pas un bon degré de présence chez les participants (Slater, Usoh et Chrysanthou, 1995).

Si l'effet de présence est dépendant de la qualité d'immersion que peut offrir la technologie, d'autres conditions sont nécessaires pour obtenir la sensation « d'être là » dans l'environnement virtuel. Une des conditions serait la qualité à laquelle un utilisateur ou un joueur peut se concentrer sur le monde virtuel. Selon Fontaine, la concentration est nécessaire afin d'obtenir un haut degré de présence (Fontaine, 1992). Mais le niveau de concentration pour exécuter une tâche peut varier selon le nombre de fois que cette tâche a été effectuée. Lorsqu'on apprend à effectuer une tâche pour la première fois, la concentration peut être élevée, mais si cette tâche est quotidienne, la concentration nécessaire pour l'exécuter sera moindre. Par exemple, la première fois qu'une personne apprend à utiliser une bicyclette, elle est très concentrée à maintenir son équilibre, mais cette concentration n'est plus nécessaire pour une personne habituée à pédaler chaque jour. Ainsi, un participant expérimentant pour la première fois un environnement virtuel aura une attention et une concentration fortement impliquées dans cette expérience, et donc un effet de présence élevé, mais cette concentration

et l'effet de présence tendraient à diminuer avec le temps au fur et à mesure que l'utilisateur répèterait la même expérience.

Selon Heeter, l'effet de présence se divise en trois catégories : la présence personnelle, la présence sociale et la présence environnementale (Heeter, 1992). La présence personnelle est basée sur le fait qu'un participant peut avoir ses sens stimulés de la même façon que dans le monde réel. Le participant peut avoir la sensation « d'être là », car les sons et les images correspondent à des éléments connus du monde réel. La reproduction des mouvements de la tête et des mains et l'effet de posséder un avatar accentuent encore plus cette illusion. Plusieurs facteurs peuvent influencer ce type de présence comme la proprioception et les interactions avec le monde virtuel.

Toujours selon Heeter, la présence sociale part du principe que si d'autres personnes sont dans le monde virtuel, alors il y a plus d'évidences que ce monde existe. S'il n'existe pas d'interaction avec les autres personnes et que vous êtes ignorés par ceux-ci, vous pouvez commencer à vous questionner sur votre propre existence. Par contre, si ceux-ci peuvent interagir avec vous et vous reconnaître, vous avez plus de chance d'avoir la sensation d'être présent et d'exister dans le monde virtuel. C'est « la sensation d'être ensemble avec une autre personne » (Biocca, Harms et Gregg, 2001).

Enfin, la présence environnementale repose sur le fait que vous pouvez interagir avec l'environnement comme déplacer des objets ou peindre sur une surface. Plus vous avez de contrôle sur l'environnement, plus vous avez l'impression d'en faire partie, ce qui contribue à augmenter l'effet de présence.

1.7 Les techniques de mesure de la présence

William Bricken a prononcé en 1990 une phrase populaire résumant bien l'essence de la réalité virtuelle : « La psychologie est la physique de la réalité virtuelle » (Bricken, 1990). Malheureusement, contrairement à la physique, la psychologie est un concept difficile à mesurer. L'effet de présence dépend surtout de la perception des gens plutôt que de règles mathématiques. De nombreux chercheurs ont tenté de trouver une façon de mesurer la présence

et de proposer leur propre technique. D'autres chercheurs donnent des points de vue différents et contredisent des techniques de mesure présentés (Slater, 1999 ; Witmer et Singer, 1998). Néanmoins, l'efficacité d'un environnement virtuel est liée à l'effet de présence rapportée par les utilisateurs. Plusieurs catégories de mesures contiennent des métriques qui présentent des corrélations avec le niveau de présence perçu : les mesures subjectives, les mesures comportementales et les mesures physiologiques.

1.7.1 Les mesures subjectives

Il est difficile de mesurer un concept psychologique tel que l'effet de présence sans utiliser des mesures subjectives. C'est pour cette raison que ce type de mesures est le plus utilisé actuellement dans la littérature. La plupart des expériences présentées par des chercheurs utilisent des questionnaires qui sont remplis par les utilisateurs généralement à la fin des expériences. Dans de nombreux cas, les participants doivent s'exposer à une expérience de réalité virtuelle et noter le degré de présence perçu en répondant à une série de questions.

Witmer et Singer ont développé en 1994 deux questionnaires pour mesurer l'effet de présence et pour mesurer la tendance de chaque individu à expérimenter cet effet de présence. Ces deux questionnaires permettent ainsi d'étudier les relations entre le degré de présence et la tendance de chaque participant (Witmer et Singer, 1994). En 1998, ils ont développé une nouvelle version de leurs questionnaires, qui sont maintenant utilisés dans plusieurs études sur l'effet de présence et la réalité virtuelle. Pour créer leurs questionnaires, Witmer et Singer ont établi qu'il y a 4 catégories de facteurs (Tableau 1.2) importants qui influencent le niveau de présence : les facteurs de contrôles, les facteurs sensoriels, les facteurs de distraction et les facteurs de réalismes. C'est à partir de ces facteurs qu'ils ont développé leurs questionnaires.

Tableau 1.2 Facteurs influençant la présence (Witmer et Singer, 1998)

Controls Factors	Sensory Factors	Distraction Factors	Realism Factors
Degree of control	Sensory modality	Isolation	Scene realism
Immediacy of control	Environmental richness	Selective attention	Information consistent with objective world
Anticipation of events	Multimodal presentation	Interface awareness	Meaningfulness of experience
Mode of control	Consistency of multimodal information		Separation anxiety/disorientation
Physical environment modifiability	Degree of movement perception Active search		

Cependant, Mel Slater critique ce questionnaire en précisant qu'il mesure en fait la perception des participants par rapport aux propriétés de l'expérience plutôt que l'effet psychologique même de la présence (Slater, 1999). Cette critique dénonce également la terminologie utilisée et démontre qu'il n'y a pas de consensus sur la terminologie pour décrire l'immersion et la présence.

Si les questionnaires de Witmer et Singer sont largement utilisés, de nombreux autres questionnaires semblables ont aussi été développés, la plupart pour mesurer l'effet de présence dans des contextes et des scénarios spécifiques ou d'autres pour mesurer des traits de personnalité. Kober et Neuper ont dressé un tableau en 2013 résumant différents questionnaires qu'ils ont identifiés dans la littérature entre 2003 et 2010 (Kober et Neuper, 2013).

Tableau 1.3 Sommaire des questionnaires évaluant la présence avec la réalité virtuelle

	Presence Measure	VR Paradigm	Examined Human Traits	Main Findings
Sas & O'Hara (2003)	Slater-Usoh-Steed Questionnaire (SUS) and self-developed presence questionnaire	Nonimmersive desktop VR, subjects navigated through virtual building	<ul style="list-style-type: none"> ● Empathy ● Imagination ● Absorption ● Willingness to experience presence 	<ul style="list-style-type: none"> ● Presence correlated with empathy, absorption, creative imagination, and willingness to experience presence ● They developed a presence equation
Laarni et al. (2004)	MEC Spatial Presence Questionnaire (MEC-SPQ), Independent Television Commission Sense of Presence Inventory	Nonimmersive desktop VR, subjects navigated through virtual building	<ul style="list-style-type: none"> ● Extraversion ● Neuroticism ● Psychoticism ● Immersive tendencies ● Impulsivity ● Sensation seeking ● Self-transcendence 	<ul style="list-style-type: none"> ● Presence correlated with extraversion, impulsivity, immersive tendencies, and self-transcendence
Nicovich et al. (2005)	Self-developed presence questionnaire	Desktop VR, subjects operated a virtual flight simulator	<ul style="list-style-type: none"> ● Empathy 	<ul style="list-style-type: none"> ● Presence correlated with empathy
Saran et al. (2005)	MEC-SPQ	Desktop VR, subjects were either exposed to a linear text, a 2D VR with hypertext intermission, a film, or a 3D virtual Mayan temple	<ul style="list-style-type: none"> ● Big Five personality traits (Neuroticism, Extraversion, Openness, Agreeableness, Conscientiousness) ● Absorption ● Spatial visual imagery ● Domain-specific interest 	<ul style="list-style-type: none"> ● Presence correlated with, absorption, domain-specific interest, and agreeableness ● These factors were good predictors for presence
Schaemie et al. (2005)	Igroup Presence Questionnaire (IPQ)	Highly immersive head-mounted display (HMD) system, subjects navigated through virtual building	<ul style="list-style-type: none"> ● Absorption ● Acrophobia ● Motion sickness ● Simulator sickness ● Computer experience 	<ul style="list-style-type: none"> ● Presence did not correlate with absorption, acrophobia, computer experience, or gender
Murray et al. (2007)	SUS	Highly immersive HMD system, subjects navigated through virtual city	<ul style="list-style-type: none"> ● Absorption ● Immersive tendencies ● Dissociation tendencies ● Locus of control 	<ul style="list-style-type: none"> ● Presence correlated with dissociation and external locus of control
Alsina-Irner & Gutiérrez-Maldonado (2010)	Igroup Presence Questionnaire	Immersive desktop VR, subjects interacted in virtual everyday life scenarios (bedroom, metro, living room, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> ● Extraversion ● Neuroticism ● Psychoticism ● Verbal and spatial intelligence ● Computer experience ● Anxiety ● Depression 	<ul style="list-style-type: none"> ● Presence correlated with test anxiety, spatial intelligence, and introversion

(Continued)

Tableau 1.3 Sommaire des questionnaires évaluant la présence avec la réalité virtuelle (suite)

	Presence Measure	VR Paradigm	Examined Human Traits	Main Findings
Wallach et al. (2010)	Presence Questionnaire	Passive desktop VR, subjects sat on a passenger seat from a virtual airplane	<ul style="list-style-type: none"> • Empathy • Imagination • Immersive tendencies • Dissociation tendencies • Locus of control 	<ul style="list-style-type: none"> • Presence correlated with immersive tendencies and empathy • Empathy and internal locus of control were the best predictor for presence

1.7.2 Les mesures comportementales

Les utilisateurs peuvent communiquer des informations à travers des questionnaires après les expériences, mais leurs réactions et leur comportement durant les expériences constitue une forme de communication non verbale qui permet aussi de récolter de l'information importante. Il devient alors intéressant d'analyser le comportement et les mouvements générés par les participants durant une expérience de réalité virtuelle. Des études ont démontré une relation entre le comportement des utilisateurs et le niveau de présence perçu (Von Der Pütten *et al.*, 2012 ; Lombard *et al.*, 2000). D'autres auteurs proposent même l'idée d'utiliser le comportement comme test pour mesurer la présence (Kavakli *et al.*, 2012). C'est que plus un participant à un niveau de présence élevé, plus sa réponse comportementale aux stimulus de l'environnement virtuel sera semblable au comportement qu'une personne peut avoir dans un environnement réel identique. Ce type de mesure a l'avantage d'être généré de façon inconsciente par l'utilisateur, contrairement aux réponses qu'ils doivent donner dans un questionnaire. Par exemple, si une balle virtuelle est lancée vers la tête de l'utilisateur et que celui-ci fait le geste de l'éviter, ceci indique qu'un effet de présence est ressenti par l'utilisateur.

Une façon intéressante de générer des comportements chez les participants est d'exploiter des scénarios et des environnements pouvant générer différentes formes de stress. Il est alors possible d'utiliser l'ambiance de l'environnement pour modifier l'état émotionnel du participant, créer un effet de surprise ou utiliser des phobies pour générer volontairement des comportements de types réflexes. Ce type de réponse aux stimulus stressant a été analysé dans différentes recherches. L'étude de Usho utilise un précipice comme environnement virtuel afin

de générer un stress (Usoh *et al.*, 1999). Cette étude part du principe que plus un participant va ressentir l'effet de présence, plus les précipices vont paraître réels, plus le comportement du participant pour éviter de tomber va s'exposer. Les participants effectuent alors des petits pas comme précaution, en évitant le plus possible la zone où ils pourraient tomber. Certains peuvent même vérifier la présence du précipice en tâtonnant du pied. L'étude a ainsi démontré une corroboration entre le comportement des participants et les mesures subjectives des questionnaires.

Les comportements de types réflexes en réponse aux stress ne sont pas les seuls qui peuvent être générés de façon inconsciente chez les participants. Les comportements sociaux comme l'interaction avec d'autres personnages virtuels peuvent être de bons indicateurs. Par exemple, si des personnages virtuels saluent le participant, ce dernier peut effectuer un geste de salut avec la main en guise de réponse, applaudir lorsqu'une tâche a été accomplie correctement et lever les bras en signe de triomphe lors d'une victoire (Molinari, Riva et Wiederhold, 1998).

La relation entre les participants, les sons et les objets dans l'environnement virtuel peuvent également avoir un impact sur leur comportement et leur perception. Slater a découvert une relation entre le niveau de présence et la perception d'objets virtuels pouvant être en conflit avec des objets réels afin de mesurer le niveau de présence (Slater, Usoh et Chrysanthou, 1995). L'expérience consistait à créer volontairement un conflit chez les participants en leur présentant d'abord une vraie radio dans le laboratoire, pour ensuite les immerger dans l'environnement virtuel, où se trouvait une radio virtuelle positionnée à la même distance et dans la même orientation que la vraie radio. Dès que les participants ne pouvaient plus voir le laboratoire avec le visiocasque, les chercheurs déplaçaient secrètement la vraie radio dans un autre endroit du laboratoire avant de l'allumer pour faire jouer de la musique. Il a ensuite été demandé aux participants de pointer la position de la source du son. Il a été démontré que plus un participant avait un niveau de présence élevé, plus les chances qu'il pointe la radio virtuelle étaient également élevées. Cependant, une hypothèse pouvant fausser les données de cette étude est qu'en présence d'un tel conflit, l'humain a tendance à se référer principalement au sens de la vue plutôt qu'à l'ouïe, ce qui aurait pu bonifier artificiellement le taux de réponse des participants ayant pointé la radio virtuelle et par le fait même, la relation entre les objets et

la perception des utilisateurs. Néanmoins, ce type de conflit peut générer de nouveaux comportements chez les participants et être un bon indice pour mesurer la présence dans des scénarios spécifiques.

1.7.3 Les mesures physiologiques

Les mesures physiologiques sont des mesures très populaires et nécessaires dans de nombreux domaines de recherche comme la santé. Certaines de ces mesures physiologiques ont été utilisées pour mieux comprendre l'effet de présence avec la réalité virtuelle. Ce qui intéresse les chercheurs avec les mesures physiologiques c'est que le croisement des données de l'activité cardiaque, de la respiration et de l'activité électrodermale permet d'identifier certains états psychologiques comme l'engagement, le stress et l'effort mental.

Wiederhold et al. ont justement fait une recherche afin d'étudier la relation entre les mesures physiologiques et l'effet de présence chez les participants dans un environnement virtuel (Wiederhold *et al.*, 2001). Leurs résultats démontrent une corrélation entre les résultats des questionnaires évaluant la présence et les données récoltées en évaluant les battements du cœur et la conductance de la peau. Ce type de mesure a l'avantage d'être plus objectif que les mesures subjectives des questionnaires et l'évaluation du comportement des utilisateurs. Une autre étude de Meehan a permis de faire la mesure de l'effet de présence dans un environnement générant du stress. L'étude a utilisé un environnement en hauteur pour provoquer le vertige chez les participants tout en mesurant le rythme cardiaque, la conductance de la peau et sa température. Cette étude a démontré une forte corrélation entre le niveau de présence et la variation des données physiologiques chez les participants (Meehan *et al.*, 2002). L'étude de Jang (2002) a aussi utilisé la peur en combinaison avec des environnements virtuels avec un scénario en avion et un autre en voiture pour établir un lien avec l'effet de présence et les mesures physiologiques.

Enfin, si les mesures physiologiques peuvent être plus objectives pour mesurer la présence, le nombre d'études et les connaissances par rapport à la corrélation entre les changements physiologiques des participants et la présence restent faibles.

1.8 Le « Flow » et le « GameFlow »

Les bases du concept de l'immersion proviennent Mihaly Csikszentmihalyi, un psychologue réputé pour ses recherches sur le bonheur et les expériences positives, mais surtout pour avoir créé la notion du « Flow ». La définition du Flow est un état d'esprit où une personne est tellement impliquée dans une activité que rien d'autre ne semble la préoccuper. C'est un état de concentration maximal, de plein engagement et d'absorption totale dans une activité (Csikszentmihalyi, 1990). Si ce concept n'a pas été créé en fonction de l'immersion dans la réalité virtuelle, des chercheurs ont démontré qu'il existe bien une corrélation entre le Flow et les environnements virtuels (Faiola *et al.*, 2013). En effet, toutes les composantes du Flow décrivent des caractéristiques pouvant être liées à des facteurs influençant l'immersion et l'effet de présence. Les huit composantes du Flow sont les suivantes :

- 1) Buts précis à atteindre
- 2) Haut degré de concentration
- 3) Diminution de la conscience de soi-même
- 4) Changement dans la perception du temps
- 5) Retour d'interaction direct ou indirect
- 6) Balance entre les habiletés et les défis
- 7) Sensation d'avoir un contrôle sur les actions
- 8) Récompenses intrinsèques.

Le concept du Flow tel que décrit par Csikszentmihalyi peut être lié à plusieurs types d'activité comme la peinture, le sport, la lecture, bref, tout type d'activités qui permet d'obtenir un haut degré de concentration (Figure 1.2).



Figure 1.2 Le concept du Flow de Csikszentmihalyi appliqué aux jeux vidéo

Ce concept a été repris et adapté aux jeux vidéo par Sweetser et Wyeth en créant le modèle du « GameFlow » comme outils d'évaluation dans le domaine (Sweetser et Wyeth, 2005). Huit composantes principales définissent le « GameFlow » : la concentration, les défis, les compétences, le contrôle, des buts précis, le retour d'information, l'immersion et les compétences sociales. Ils ont ainsi dressé une liste de critères d'évaluation permettant de déterminer l'efficacité d'un jeu à être amusant et permettant au joueur de s'y engager. Puisque l'objectif de ce projet est d'évaluer des sujets lors d'une activité de jeu avec la réalité virtuelle et d'en mesurer le comportement, il est donc intéressant d'analyser les critères utilisés dans cette étude. Les auteurs ont présenté les différents critères d'évaluation (Tableau 1.4), divisé par les huit composantes du GameFlow :

Tableau 1.4 Résumé des critères du GameFlow (Sweetser et Wyeth, 2005)

Composantes	Critères d'évaluation en lien avec l'immersion
<p>Concentration Le jeu doit nécessiter une concentration et le joueur doit pouvoir se concentrer sur le jeu</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'expérience doit fournir plusieurs stimulus de différentes sources • L'expérience doit capter l'attention du participant et la maintenir • La charge de travail demandé par l'expérience doit être élevée tout en respectant la perception, les limites cognitives et la mémoire des participants
<p>Défis Le jeu doit offrir suffisamment de défis et correspondre avec les compétences du joueur</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les défis doivent correspondre aux compétences du joueur • Le jeu doit offrir plusieurs niveaux de défis pour différents joueurs • La difficulté des défis doit augmenter de la même façon que les compétences du joueur
<p>Compétences du joueur Le jeu doit développer les compétences du joueur</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Apprendre le jeu ne doit pas être ennuyant • Le jeu doit offrir un tutoriel ou une façon d'initier le joueur au jeu • Le jeu doit permettre au joueur d'améliorer et de maîtriser de nouvelles compétences • Le joueur doit être récompensé pour ses efforts et le développement de ses compétences • L'interface et les mécanismes du jeu doivent être faciles à apprendre
<p>Contrôle Les joueurs doivent avoir un sentiment de contrôle sur les actions dans le jeu</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le joueur doit sentir avoir le contrôle de son avatar, des mouvements et des interactions avec le monde virtuel • Le joueur doit sentir avoir le contrôle sur l'interface • Le joueur doit sentir que ses actions ont un impact sur le monde virtuel
<p>Buts précis Le jeu doit offrir aux joueurs des buts précis au moment approprié</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les objectifs principaux doivent être clairs et présentés dès le début du jeu • Les objectifs secondaires doivent être clairs et présentés au moment approprié
<p>Retour d'informations Le joueur doit recevoir un retour d'information aux moments appropriés</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le joueur doit avoir des retours d'informations sur sa progression, ses actions, son score et son statut

Tableau 1.4 Résumé des critères du GameFlow (Sweetser et Wyeth, 2005) (suite)

<p>Immersion Le joueur doit vivre une expérience profonde et être engagé dans le jeu</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le joueur doit être moins alerte à son environnement immédiat • Le joueur doit expérimenter une distorsion du temps • Le joueur doit se sentir impliqué émotionnellement • Le joueur doit être moins conscient de lui-même
<p>Interaction sociale Le jeu doit supporter et créer des opportunités d'interaction sociale</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le jeu doit supporter la coopération et la compétition • Le jeu doit supporter l'interaction sociale entre deux joueurs

Si ces critères permettent de différencier entre un jeu qui est aimé des joueurs et un jeu qui l'est moins, ils peuvent également servir à mesurer l'efficacité d'une expérience de jeu dans la réalité virtuelle, particulièrement parce que la concentration, le contrôle et l'immersion sont des composantes généralement très importantes lors d'une expérience dans un environnement virtuel. De plus, si un jeu est considéré comme offrant plus de plaisir à des joueurs, cela pourrait se refléter dans leur comportement et leurs émotions.

1.9 La réalité virtuelle et les émotions

Les états émotionnels ont un impact sur la façon dont les individus réagissent à un environnement virtuel (Huang et Alessi, 1999). Ces émotions peuvent modifier les comportements, l'engagement, la perception et la réaction des individus face aux différents stimulus d'une expérience virtuelle. Il a aussi été démontré que les émotions ont un impact sur le niveau de présence, et inversement, le niveau de présence peut influencer les réactions émotionnelles (Baños *et al.*, 2004 ; Diemer *et al.*, 2015 ; Riva *et al.*, 2007). Il est donc intéressant de comprendre comment ces émotions peuvent être produites dans un environnement virtuel et de quelles façons cela peut impacter une expérience.

Plusieurs chercheurs utilisent les jeux vidéo et la réalité virtuelle afin de simuler l'environnement du monde réel pour plusieurs raisons : augmenter l'engagement des joueurs dans les jeux, améliorer les performances lors d'un apprentissage, renforcer des liens

émotionnels avec des personnages et des histoires fantastiques, etc. Il n'est donc pas étonnant de voir plusieurs études ayant un lien avec les émotions et les expériences virtuelles, comme les jeux vidéo. Sans émotion, personne ne serait motivé à jouer à ces jeux ou à explorer des mondes virtuels. Les émotions sont des réactions provoquées par une stimulation provenant de l'environnement. La conception d'un environnement virtuel permet donc aux créateurs d'avoir un certain contrôle sur les émotions qui seront produites chez les joueurs et les utilisateurs.

Morie et son équipe présentent le concept « d'affordances émotionnelles » pour la création de leur environnement virtuel dans leur étude. Si le terme « affordance » définit par Gibson (Gibson, 2014) est un indice de perception de la fonction d'un objet offrant une possibilité d'action possible, Morie élargit le concept en décrivant l'affordance émotionnelle comme étant un signal sensoriel en fonction d'un stimulus qui provoque une réaction émotionnelle (Morie *et al.*, 2005). Il présente quelques exemples d'affordances émotionnelles dans son expérience : des créatures dans un endroit sombre et inconnu provoquant le malaise, des lumières clignotantes pour attirer le regard vers un évènement important et des bruits étranges et des grondements pour provoquer la peur.

Frome présente plusieurs façons utilisées par les jeux vidéo pour générer des émotions. Selon lui, un facteur important pour générer des émotions est le rôle que la personne prend dans un jeu, soit en étant un observateur ou un acteur (Frome, 2007). Un joueur observateur va générer des émotions selon ce qu'il voit, entend et perçoit dans son environnement, par exemple, voir quelqu'un voler une voiture peut générer de la colère. Un joueur participant va principalement générer des émotions sur les actions qu'il prend plutôt que ce qu'il perçoit. Ce type d'émotions est lié avec la proprioception que l'on retrouve avec la réalité virtuelle. Le jeu très populaire « The Witcher 3 : Wild Hunt » est un très bon exemple, où le joueur doit constamment prendre des décisions pouvant sauver des vies ou blesser des gens, provoquant différents types d'émotions.

Le type de jeu impacte également les émotions qui peuvent être générées. Un jeu compétitif peut générer de la joie ou de la frustration selon si le joueur gagne ou perd une partie. Un jeu narratif va générer des émotions basées sur les évènements qui se produisent dans l'histoire,

de la même façon qu'un film. Un jeu multijoueur peut générer des émotions sociales en interagissant avec d'autres joueurs, comme le regret ou la loyauté.

L'environnement lui-même et l'ambiance projetée peuvent également susciter des émotions. L'étude de Riva génère des émotions différentes chez les utilisateurs simplement en modifiant l'ambiance d'un même environnement. Il utilise un parc ayant une ambiance chaleureuse pour générer le bonheur et le même parc avec une ambiance lugubre pour générer l'anxiété (Riva *et al.*, 2007). D'autres chercheurs utilisent également des environnements stressants tels qu'un précipice, une maison en flamme ou même des animaux menaçants pour générer des réactions et des émotions qui ne sont pas possibles autrement chez les sujets tel que la sensation de vertige et d'autres phobies de l'espace (Meehan *et al.*, 2002 ; Kavakli *et al.*, 2012).

Stéphane Bura va dans le même sens en résumant bien le lien qu'il peut y avoir entre le type d'expériences, les émotions générées et les interactions avec les joueurs. Il donne comme exemple un joueur qui obtient plus de protection face à des monstres ou qui découvre des pouvoirs surhumains. Ces améliorations vont générer de la confiance chez ce joueur. Ainsi, un joueur confiant pourra adapter ses actions, être proactif et prendre de plus grands risques, ce qui peut modifier et faire réagir l'environnement, modifiant à nouveau les émotions du joueur. Ceci crée donc un cycle entre les émotions, les interactions et les variables du jeu (Bura, 2008).

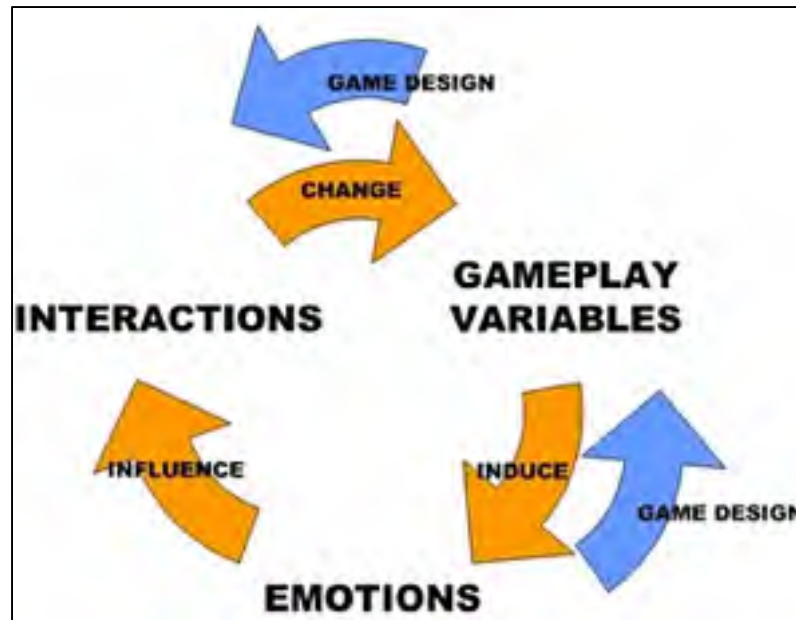


Figure 1.3 Cycle entre les émotions, les interactions et les variables du jeu (Bura, 2008)

1.10 Les mouvements du corps et les émotions

Une importante portion de la communication chez l'humain passe par la communication non verbale. À travers les gestes, le regard, les mouvements et la position d'une personne, il est possible de faire passer un message avec le corps et même des émotions. Cependant, il n'est pas commun pour un système informatique de détecter et de s'adapter aux états psychologiques des humains à partir de la communication non verbale. L'un des buts de l'informatique affective est justement de détecter automatiquement les émotions humaines. Plusieurs travaux antérieurs ont tenté de détecter des états émotionnels à travers différents moyens, incluant l'analyse des interactions avec le clavier et la souris (Kołakowska, 2013 ; Hernandez *et al.*, 2014), l'analyse des expressions faciales (De Silva *et al.*, 1997), l'analyse de la voix (Dellaert, Polzin et Waibel, 1996) et l'utilisation de différents signaux physiologiques tels que le rythme cardiaque ou l'activité électrique du cerveau (Drachen *et al.*, 2010 ; Nacke *et al.*, 2011 ; Nacke, 2009). Plusieurs autres articles existent également sur l'informatique affective (Calvo et D'Mello, 2010 ; Gunes et Pantic, 2010 ; Gunes, Piccardi et Pantic, 2008 ; Zeng *et al.*, 2009).

Depuis le célèbre ouvrage de Darwin « The expression of the emotions in man and animals » (Darwin, Ekman et Prodger, 1998), de nombreuses recherches ont été effectuées pour démontrer qu'il est possible de faire la détection d'émotions à travers l'expression corporelle et par la manifestation de différents gestes du corps (Kleinsmith et Bianchi-Berthouze, 2013 ; Karg *et al.*, 2013). En adoptant certaines postures, il est possible d'envoyer des messages clairs quant à sa volonté et sa capacité de participer à des interactions sociales. Ces postures peuvent être accompagnées de différents gestes et de mouvements pouvant renforcer le message (Fabri, Moore et Hobbs, 1999). De plus, il a même été démontré que l'expression corporelle a l'avantage d'être perçue à une distance plus lointaine que les expressions faciales (de Gelder, 2009). Certaines postures peuvent aussi avoir une signification claire à travers plusieurs cultures, comme le rejet, l'incompréhension et l'attention (Fabri, Moore et Hobbs, 1999). D'autres travaux ont tenté d'exploiter les postures et les mouvements du corps pour la détection d'émotions (Alborno *et al.*, 2016 ; Castellano, Villalba et Camurri, 2007 ; Kapur *et al.*, 2005 ; Kleinsmith, Fushimi et Bianchi-Berthouze, 2005 ; Piana *et al.*, 2013 ; Piana *et al.*, 2016). Plusieurs de ces travaux ont utilisé des acteurs pour exprimer différentes émotions à travers plusieurs poses et mouvements pouvant être amplifiés. En comparaison, le présent projet de recherche utilise la réalité virtuelle qui a l'avantage de simuler des scénarios avec des utilisateurs réels pour permettre de capturer les mouvements et les réactions spontanés pouvant être générés par des stimulus contrôlés, ce qui reflète mieux une situation réelle.

Avec l'émergence de caméras, de capteurs, de systèmes de réalité virtuelle et de systèmes de réalité augmentée à faible coût pouvant suivre les mouvements du corps, la détection d'émotions par ces mouvements va permettre de développer plusieurs nouvelles fonctionnalités et applications. Certains jeux vidéo exploitent déjà les mouvements du corps comme la console Nintendo Wii et la caméra Microsoft Kinect. Savva (Savva, Scarinzi et Bianchi-Berthouze, 2012) explique que de nombreuses études ont démontré que les mouvements des joueurs peuvent avoir un impact sur l'effet de présence, sur leurs états émotionnels, sur leur engagement social et sur leur engagement dans un jeu. Ces jeux présentent généralement l'utilisateur sous forme d'avatar dans l'environnement virtuel tout en permettant à l'utilisateur de contrôler directement son avatar en temps réel, telle une marionnette, à partir des mouvements de son corps. Il est ainsi possible de transmettre les

émotions à travers un environnement virtuel. L'étude de Savva a aussi démontré que des sujets sont capables de classer des avatars animés parmi une sélection d'émotions, ce qui permet d'offrir des interactions sociales et virtuelles plus complexes (Savva, Scarinzi et Bianchi-Berthouze, 2012).

Wallbot (Wallbott, 1998) a épluché l'œuvre de Darwin (1998) en répertoriant les différents comportements non verbaux accompagnant la manifestation de diverses émotions. Le tableau suivant présente un résumé de ces comportements. Wallbot a également démontré qu'il existe des mouvements distinctifs ou des caractéristiques permettant de distinguer les émotions entre elles. L'intensité des mouvements est également un autre facteur permettant de distinguer les émotions.

Tableau 1.5 Les mouvements et postures accompagnant des émotions spécifiques

Émotions	Comportement
Joie	Divers mouvements sans but, sauter, danser de joie, taper des mains, rire en faisant sautiller la tête, rire excessif en projetant le corps vers l'arrière, forte activité de mouvement
Tristesse	Immobile, passif, avoir la tête basse
Fierté	Avoir le corps et la tête droite
Honte	Mouvement nerveux, détournement du regard, maladresse des mouvements, se pencher
Peur/Terreur	Tête entre les épaules, immobile, accroupie, mouvements convulsifs, se protéger en couvrant rapidement son visage avec ses mains, fermer et ouvrir les mains de façon répétitive, forte activité de mouvement
Rage/Colère	Tremblement du corps, intention de pousser ou de frapper, lancer des objets, la tête haute, la poitrine gonflée, les pieds ancrés au sol, bras rigide, épaules carrées, forte activité de mouvement
Dégoût	Geste pour repousser, geste de protection, cracher, les bras serrer sur les côtés

Les travaux les plus pertinents en lien avec notre étude sont ceux de Kleinsmith et Savva (Kleinsmith, Bianchi-Berthouze et Steed, 2011 ; Savva, Scarinzi et Bianchi-Berthouze, 2012). Ces travaux effectuent de la détection d'émotions à partir des mouvements du corps sans acteurs. Kleinsmith classe des états émotionnels à partir de postures du corps statiques alors que Savva classe des états émotionnels à partir des mouvements dans le temps. Dans ces deux travaux, les données sont capturées par des utilisateurs debout jouant à un jeu vidéo avec la console Nintendo Wii. Pour ces deux cas, un système de capture de mouvement analysant l'ensemble du corps a été utilisé. Avec ces données, ils ont utilisé des algorithmes d'apprentissage machine pour effectuer l'entraînement et tester la reconnaissance d'états émotionnels. Les caractéristiques qu'ils ont analysées sont les articulations du corps humain et les valeurs pouvant être reliées à celles-ci comme la vitesse angulaire. Les utilisateurs ont expérimenté différents états émotionnels à travers les jeux vidéo et ceux-ci ont été identifiés par d'autres juges humains. Kleinsmith a entraîné un algorithme « Multilayer Perceptron (MLP) » pour classifier les états émotionnels et a obtenu une performance approximant 60%. Savva a plutôt entraîné un algorithme « Recurrent Neural Net (RNN) » pour atteindre une performance approximant 61%. Les deux travaux ont été démontrés que la performance des algorithmes d'apprentissages utilisés est comparable aux jugements d'humains.

Aucune étude tentant de détecter des états émotionnels en utilisant un système de réalité virtuelle et la capture de mouvement n'a été identifiée. Cependant, certains avancements technologiques existent dans ce sens comme le dispositif FACETEQ (Mavridou *et al.*, 2017) pour les casques de réalité virtuelle. C'est un appareil permettant de faire de la reconnaissance d'expression faciale et d'émotions avec l'électromyogramme (EMG) qui détecte les mouvements des muscles du visage.

Ce qui est clair c'est que la réalité virtuelle peut générer des émotions de nombreuses façons : par les histoires narratives, par les interactions sociales, par l'ambiance et l'environnement, par les actions et la liberté de l'utilisateur, par des affordances émotionnelles (sons, images), par la difficulté des tâches demandées et par la communication d'informations avec l'utilisateur.

1.11 La proprioception, l'incarnation d'un avatar et la réalité virtuelle

Une des techniques utilisées dans plusieurs études pour augmenter l'effet de présence dans un environnement virtuel est l'augmentation de la proprioception des sujets au moyen d'un avatar. En effet, plus le lien et l'exactitude entre les mouvements d'un utilisateur et ceux de son avatar sont élevés, plus la proprioception de cet utilisateur sera élevée, plus son niveau de présence sera également élevé (Usoh *et al.*, 1999 ; Slater et Wilbur, 1997). La proprioception peut se définir comme suit :

« La proprioception est la perception de la position et de l'orientation des différentes parties de son corps. » (Boff, Kaufman et Thomas, 1986)

Dans l'état actuel de la réalité virtuelle, les utilisateurs doivent mettre un visiocasque qui masque l'environnement réel, rendant impossible l'observation visuelle de leur propre corps. Mais grâce à la proprioception, il est tout de même possible de connaître l'emplacement de ses membres dans l'espace. Cependant, il a été démontré que la représentation visuelle de notre corps a une importance dominante chez l'humain. Lorsqu'il y a un conflit entre la perception visuelle et la position réelle d'un membre, l'humain a une forte tendance à résoudre le conflit en optant pour la position visuelle du membre, manipulant ainsi la proprioception. Cet effet peut notamment se produire à l'aide d'un avatar (Mohler *et al.*, 2010).

Un avatar est un comme une marionnette virtuelle que l'utilisateur peut manipuler avec son propre corps (Barrientos, 2000). C'est la représentation digitale d'un humain dans la réalité virtuelle (Bailenson et Blascovich, 2004). La représentation d'un avatar comprend plusieurs fonctions importantes dans un environnement virtuel : l'incarnation visuelle de l'utilisateur, un moyen d'interactions avec l'environnement, un moyen d'interactions sociales et un moyen de détecter divers attributs de l'environnement virtuel (Guye-Vuillème *et al.*, 1999). Cela donne la possibilité d'agir dans un environnement virtuel de la même façon que dans l'environnement réel et ainsi d'obtenir des interactions plus intuitives.

Mais plusieurs utilisateurs rapportent le besoin de « sentir » la posture de leur avatar et demandent de pouvoir observer leur corps dans l'environnement virtuel. En effet, certains

utilisateurs ont signalé perdre la position de leurs membres, créant une disparité dans leurs actions, une plus grande confusion et donc, une perte de la proprioception (Guye-Vuillème *et al.*, 1999 ; Slater *et al.*, 2000). Cependant, ce problème est difficile à résoudre si le système ne permet pas de faire le suivi complet du corps de l'utilisateur, rendant difficile l'animation de son avatar tout en respectant la position et la rotation de tous les membres de l'utilisateur. Afficher un avatar qui n'effectue pas le même mouvement peut nuire à la proprioception, l'incarnation et réduire l'effet de présence à cause de la disparité entre les vrais mouvements de l'utilisateur et de son avatar. La fidélité du mouvement de l'avatar est plus importante pour l'incarnation que sa fidélité visuelle (Lok *et al.*, 2003). Un bon avatar n'a pas nécessairement besoin d'être réaliste et d'avoir une représentation exacte de la physiologie d'un humain dans les détails (Benford *et al.*, 1995).

La célèbre expérience d'illusion de la main en caoutchouc a démontré le sentiment d'appropriation et d'incarnation d'un corps (Botvinick et Cohen, 1998). Cette expérience consistait à cacher le bras des participants derrière un écran afin que ceux-ci ne puissent qu'observer l'autre bras en caoutchouc présenté devant eux. Les deux bras recevaient ainsi une stimulation identique simultanément, de sorte que les participants déclaraient sentir que le bras en caoutchouc faisait partie de leur corps. Cette expérience a même été reproduite avec succès en utilisant un bras virtuel et des lunettes stéréoscopiques (Slater *et al.*, 2008). Suite à ces expériences, il est devenu évident que l'on puisse incarner des objets externes comme des prothèses, des mains en caoutchouc, des outils et même des avatars virtuels (De Vignemont, 2011). La définition du sentiment d'incarnation peut se décrire comme suit :

« The sense of embodiment toward a body B is the sense that emerges when B's properties are processed as if they were the properties of one's own biological body. » (Kilteni, Groten et Slater, 2012)

Dans le contexte de la réalité virtuelle, il est possible d'incarner le corps d'un avatar et d'avoir le sentiment de le posséder. Ceci offre la possibilité aux utilisateurs d'avoir l'impression de ressentir des sensations différemment selon le type de simulation en plus de pouvoir modifier leur comportement en conséquence. Par exemple, avoir une plus grande tendance à éviter les

dangers pouvant blesser le corps virtuel, tel que le feu ou des objets tranchants (Argelaguet *et al.*, 2016). Une étude a même démontré que l'incarnation d'un avatar peut améliorer les performances cognitives dans un environnement virtuel (Steed *et al.*, 2016).

Il est aussi important de mentionner que tous les mouvements et ces comportements peuvent être reproduits sur un avatar dans un environnement virtuel, permettant la perception d'émotions. La réalité virtuelle permet ainsi d'offrir de relations interpersonnelles pouvant être très complexes, grâce à la proprioception, l'incarnation et le contrôle d'un avatar virtuel.

CHAPITRE 2

Problématique

2.1 Complexité des données

L'un des défis avec les principaux concepts de la réalité virtuelle, tels que l'immersion et l'effet de présence, consiste à en mesurer les aspects psychologiques. Certains questionnaires présentés dans la revue de la littérature proposent différentes techniques permettant de mesurer ces données subjectives. Cependant, ces mêmes données peuvent être influencées par l'expérience d'un participant et sa propre perception du monde virtuel. De plus, il est difficile de mettre en place de tels questionnaires dans un contexte réel, car les utilisateurs ne sont généralement pas intéressés à répondre à plusieurs questions immédiatement après leur divertissante séance de réalité virtuelle. Il est donc important d'utiliser d'autres méthodes d'analyses afin de rendre plus accessible la compréhension des utilisateurs immergés dans des mondes virtuels. Il est donc logique de s'intéresser aux données physiologiques. Ces données ont l'avantage de ne pas pouvoir être influencées directement par l'utilisateur et elles sont facilement mesurables. Mais, les capteurs utilisés pour récolter ces données sont intrusifs et ne sont pas intégrés automatiquement avec les systèmes de réalité virtuelle, rendant impossible l'analyse de l'ensemble des utilisateurs pour un concepteur d'application de réalité virtuelle. Cependant, pour fonctionner, ces systèmes possèdent plusieurs capteurs afin de capturer les différents mouvements des utilisateurs. Tel que présenté dans la revue de la littérature, des études ont démontré qu'il est possible de reconnaître les émotions à travers les mouvements du corps de participants. Un exemple de mouvement démontrant clairement une différence d'état psychologique est la vitesse de rotation de la tête. Quand une personne fait des mouvements rapides et secs de la tête, elle peut se sentir en situation de danger et surveiller l'environnement autour d'elle. Au contraire, si une personne fait des mouvements lents et fluides de la tête, la personne sera généralement dans un état plus calme. Ainsi, en détectant ces états, il serait possible de modifier en temps réel l'expérience afin de guider l'utilisateur vers l'état psychologique désiré. Il est donc raisonnable de croire que l'utilisation des capteurs

de mouvement intégrés dans les systèmes de réalité virtuelle pourrait permettre de reconnaître à un certain degré des états psychologiques des participants. Présentement, il n'existe pas d'algorithmes utilisant des systèmes de réalité virtuelle pour estimer différents états psychologiques d'un utilisateur comme le stress ou la peur, afin d'adapter une expérience en conséquence et d'offrir une interaction plus personnalisée.

2.2 Questions de recherche

Étant donné la complexité à reconnaître et à détecter la vaste gamme d'états émotionnels des utilisateurs de réalité virtuelle, cette étude simplifie le problème à savoir s'il est possible de reconnaître une situation de calme ou de stress chez un utilisateur. On peut ainsi se poser les questions suivantes afin de décomposer ce problème :

1. Est-il possible de reconnaître un utilisateur de réalité virtuelle qui se trouve dans une situation calme ou une situation stressante à partir des données de mouvements provenant d'un système de réalité virtuelle et de données physiologiques?
2. Quelles sont les caractéristiques de mouvements provenant d'un système de réalité virtuelle qui contribuent le plus à reconnaître un utilisateur qui se trouve dans une situation calme ou stressante?
3. Quels sont les algorithmes d'apprentissage machine qui offrent un meilleur taux de reconnaissance pour détecter si un utilisateur se trouve dans une situation calme ou stressante à partir des données de mouvements provenant d'un système de réalité virtuelle et des données physiologiques?

CHAPITRE 3

Méthodologie

3.1 Équipements utilisés

Cette étude a été réalisée en utilisant le système de réalité virtuelle HTC Vive. Ce système inclut un casque de réalité virtuelle ainsi que deux contrôleurs, soit un pour chaque main. L'une des raisons pour lesquelles ce système a été choisi pour cette expérience est sa possibilité d'offrir aux participants de se déplacer dans l'environnement, autant virtuel que réel. C'est que le système intègre également deux émetteurs infrarouges nommés « Lighthouse ». Ces émetteurs agissent comme point de référence pour tous les dispositifs de suivi compatibles en bombardant l'environnement de lumière non visible. Ces dispositifs de suivi sont munis de plusieurs photosenseurs permettant de capter la lumière projetée et de déterminer leur position et l'orientation exacte dans l'espace par rapport aux émetteurs avec une précision de l'ordre du millimètre (0.3mm à 2mm selon différents facteurs)¹.

¹ <https://www.roadtovr.com/analysis-of-valves-lighthouse-tracking-system-reveals-accuracy/>



Figure 3.1 Émetteurs infrarouges inclus dans le système de réalité virtuelle HTC Vive²

Avec le casque et les deux contrôleurs, il est ainsi possible d'effectuer le suivi d'une personne dans l'espace virtuel. Mais afin de récolter plus d'informations sur les mouvements des participants et afin d'obtenir une plus grande précision sur l'estimation du mouvement de leur corps de façon générale, trois capteurs supplémentaires nommés « Vive tracker³ » ont été utilisés. Ces capteurs ont été conçus spécifiquement pour faire le suivi de différentes parties du corps et même pour réaliser le suivi d'objets pouvant être manipulés par les utilisateurs dans l'espace. Par exemple, il est possible de mettre un de ces capteurs sur une raquette afin de représenter sa position et son orientation avec une raquette virtuelle. Dans le cas de notre expérience, les trois capteurs ont été utilisés pour faire le suivi des deux pieds et du bassin afin de couvrir la partie inférieure du corps.

L'environnement virtuel a été conçu afin que les participants puissent se déplacer physiquement dans un espace de 2.5 mètres par 2.5 mètres. Pour ce faire, deux trépieds ont été positionnés à chaque extrémité de la zone dédiée à l'expérience. Les deux émetteurs du système ont été fixés sur ces trépieds à une hauteur de 2 mètres, orientés l'un vers l'autre avec un angle d'environ 40 degrés, pointant ainsi vers le sol au centre de la zone de déplacement,

² <https://read.bi/2Lxi3dm>

³ <https://www.vive.com/eu/vive-tracker/>

afin de bien couvrir tout l'espace physique de lumière infrarouge et assurer un bon suivi des participants. De plus, pour des raisons de sécurité, nous nous sommes assuré qu'aucun objet ne soit situé à l'intérieur de la zone et même à 1 mètre de distance à l'extérieur de la zone, créant ainsi une zone tampon, afin d'éviter tout incident ou blessure potentiels.

Le HTC Vive inclut également le système « Chaperone » dont le but principal est d'informer les utilisateurs lorsqu'ils approchent une barrière physique ou la limite de la zone de déplacement. Ce système est important puisque les utilisateurs n'ont pas de contact visuel avec l'environnement physique, car ils portent un casque sur la tête bloquant complètement leur champ de vision. Son fonctionnement est simple, lorsque l'utilisateur approche la limite prédéterminée par l'expérience, un grillage bleu représentant la frontière de la zone de déplacement s'affiche par-dessus l'environnement virtuel et disparaît lorsque l'utilisateur s'éloigne de cette barrière.

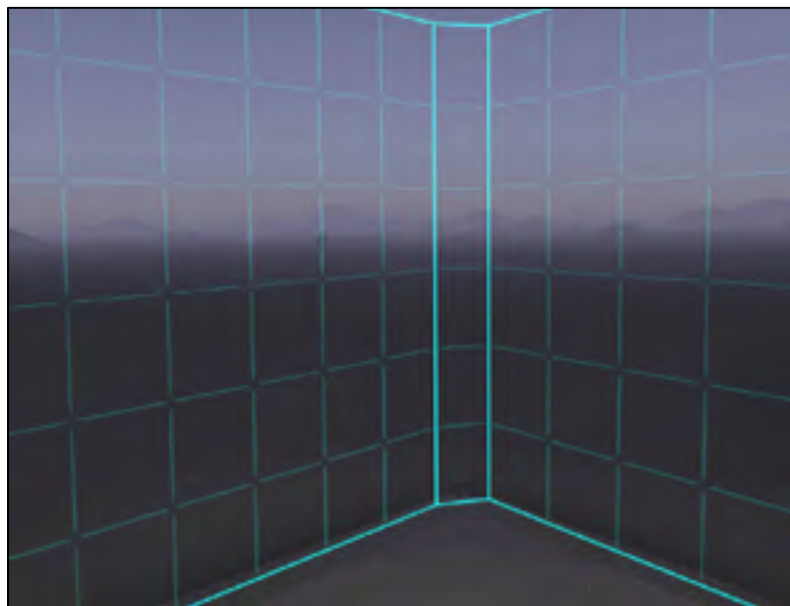


Figure 3.2 Exemple du système Chaperone permettant de limiter l'espace physique dans l'environnement virtuel à l'aide d'une grille

Le système de réalité virtuelle HTC Vive n'est pas un casque autonome et nécessite donc d'être connecté directement à un ordinateur à l'aide de trois câbles attachés ensemble et ayant une longueur de 4.5 mètres. Le premier câble est un câble HDMI permettant de transmettre l'information visuelle aux écrans situés à l'intérieur du casque. Le deuxième câble est un câble USB permettant de transmettre les informations des différents capteurs du casque à l'ordinateur. Le troisième câble est celui servant à l'alimentation du casque en énergie. Bien qu'il existe certains modules comme le « TPCAST ⁴ » permettant d'éliminer les câbles, ceux-ci n'ont pas été utilisés pour éviter tout problème de latence et de perte d'informations lors du transfert des données. De plus, ces modules sont à ce jour qu'à l'étape de prototype et plusieurs ne sont toujours pas disponibles au Canada. Ainsi, afin d'éviter tout incident pouvant se produire avec le câble, une personne responsable s'est occupée de le maintenir et de le déplacer de sorte que les participants ne s'y enroulent pas et ne trébuchent pas.

L'ordinateur utilisé pour animer l'environnement virtuel et effectuer la collecte de données est un ordinateur de bureau qui a été personnalisé spécifiquement pour des expériences de réalité virtuelle. Le système d'exploitation utilisé est Windows 10 version éducative 64 bits. L'ordinateur est muni de 24GB de mémoire RAM, d'un processeur Intel i7-2600K cadencé à 3.40 GHz ainsi que d'une carte graphique NVIDIA GTX 970.

Afin d'isoler les participants de l'environnement physique et ainsi augmenter le degré d'immersion de l'expérience, un casque d'écoute a été utilisé. Le casque sélectionné est le *Siberia Elite Prism* produit par *SteelSeries* ⁵. La particularité de ce casque d'écoute est qu'il est muni de deux coquilles permettant d'envelopper complètement les oreilles d'une personne afin d'éliminer le plus possible les sons externes pouvant être hors de contrôle. De plus, le casque permet de reproduire la spatialisation du son avec la technologie « Dolby Surround 7.1 » tout en permettant de reproduire des sons variant de 16 Hz à 28 000 Hz dans le domaine fréquentiel.

⁴ <https://www.tpcastvr.com/>

⁵ <https://steelseries.com/gaming-headsets/siberia-650>

En plus du système de réalité virtuelle et de l'ordinateur nécessaire à son fonctionnement, deux autres capteurs ont été utilisés afin de récolter des données physiologiques des participants. Le premier capteur est une ceinture *Polar H10*⁶ permettant d'enregistrer le rythme cardiaque grâce à des électrodes. Il est composé d'une bande élastique que l'on peut porter sur la poitrine ou sur le ventre. La bande intègre trois électrodes et un émetteur afin d'envoyer l'information à un appareil mobile qui agit comme récepteur grâce à l'application *Polar Beat*⁷. Appuyez contre la peau, les électrodes récupèrent les signaux électriques dégagés par les battements cardiaques et envoient l'information à l'émetteur. Chaque séance enregistrée avec ce capteur peut être exportée dans un tableur numérique contenant plusieurs informations : la date et l'heure de la session, le rythme cardiaque moyen de la séance, la durée de la séance et le nombre de battements par minutes estimé pour chaque seconde de la séance.



Figure 3.3 Capteurs de rythme cardiaque
Polar H10

Le deuxième capteur mesure l'activité électrodermale. La conductivité de la peau peut changer selon les émotions conscientes ou inconscientes pouvant être influencées par des bruits soudains, des odeurs, le toucher, la douleur ou la vue. Le capteur utilisé est le *Consensys GSR*

⁶ https://www.polar.com/ca-en/products/accessories/h10_heart_rate_sensor

⁷ <https://play.google.com/store/apps/details?id=fi.polar.beat&hl=en>

fournit par l'entreprise *Shimmer* ⁸. La mesure de l'activité électrodermale, aussi appelée conductance cutanée ou conductivité de la peau fonctionne en enregistrant l'activité électrique sur la surface de la peau, plus précisément entre deux doigts dans le cas de ce capteur. Après chaque séance, il est nécessaire de connecter le capteur à l'ordinateur pour exporter les données dans un tableur numérique à l'aide du logiciel fourni. Le tableur contient les informations sur la résistance en kiloohm ($k\Omega$), sur la conductance en microsiemens (μS) et l'heure en millisecondes (ms), avec une fréquence de 15 Hz.



Figure 3.4 Le capteur Consensus GSR mesurant l'activité électrodermale

3.2 Développement

3.2.1 L'environnement de développement de l'expérience

L'expérience virtuelle réalisée par les participants a été développée avec le moteur de jeu vidéo : Unity3D ⁹. Ce logiciel permet de créer des jeux vidéo, des animations et du contenu

⁸ <http://www.shimmersensing.com/products/gsr-optical-pulse-development-kit>

⁹ <https://unity3d.com/>

interactif en 2D et 3D. Une licence personnelle du logiciel a été utilisée dans ce projet. Elle permet à tous les petits créateurs (générant peu ou pas de revenus) d'utiliser le logiciel gratuitement avec certaines fonctionnalités limitées. Unity3D possède l'avantage d'avoir une grande communauté de développeurs et d'avoir nombreux tutoriels vidéo rendant son utilisation très accessible. Il est également compatible avec la plateforme de développement du casque de réalité HTC Vive. Le langage de programmation utilisé dans cet engin est le C#.

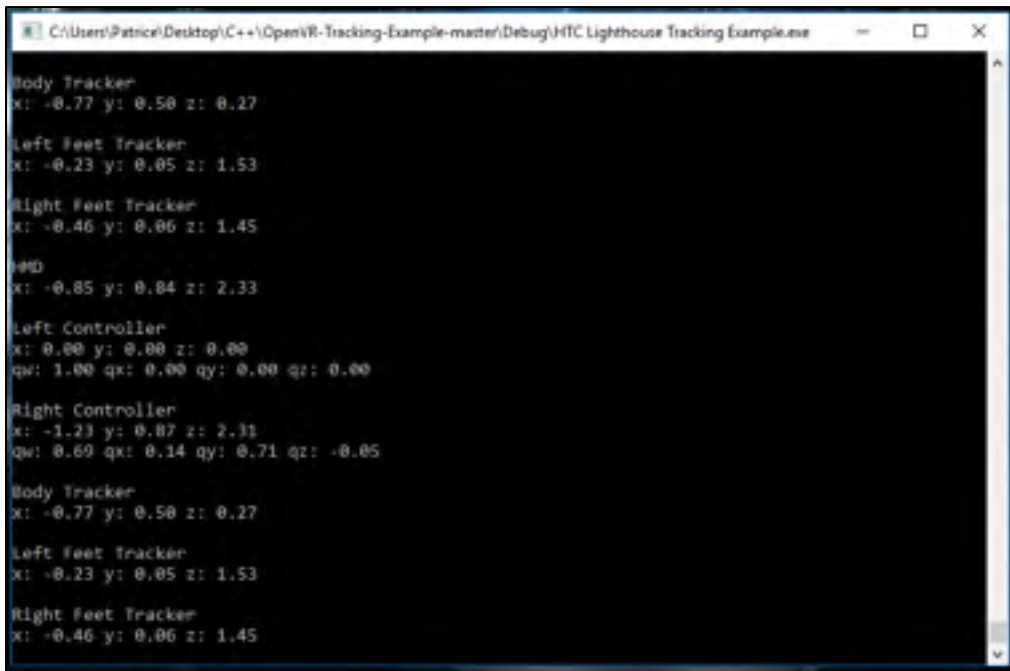
3.2.2 L'application de capture de données de mouvement

L'application de captures de données est basée sur le kit de développement « OpenVR »¹⁰ permettant d'accéder aux informations des différents capteurs de plusieurs casques de réalité virtuelle, dont le HTC Vive. Tout comme le kit de développement, l'application de capture est programmée avec le langage de programmation C++. L'application collecte, pour chacun des capteurs du système de réalité virtuelle, la position, la rotation, la vitesse, la vitesse angulaire et l'horodatage (en anglais : timestamp) à la milliseconde près. La fréquence à laquelle ces données sont collectées est de 100 Hz.

Lors du démarrage de l'application, une fenêtre de console s'ouvre et demande d'appuyer sur une touche pour démarrer la capture. Une fois la capture des données enclenchée, il suffit d'appuyer sur une autre touche pour arrêter cette capture et générer automatique un fichier de type CSV contenant toutes les informations.

Cette application est indépendante et permet d'activer la capture de données en même temps que l'exécution de l'expérience avec l'engin Unity3D. La Figure 3.5 présente l'application de capture de données. On peut y lire les coordonnées spatiales de tous les capteurs durant une séance de capture.

¹⁰ <https://github.com/ValveSoftware/openvr>



```
C:\Users\Patrice\Desktop\C++\OpenVR-Tracking-Example-master\Debug\HTC Lighthouse Tracking Example.exe

Body Tracker
x: -0.77 y: 0.50 z: 0.27

Left Feet Tracker
x: -0.23 y: 0.05 z: 1.53

Right Feet Tracker
x: -0.46 y: 0.06 z: 1.45

HEAD
x: -0.85 y: 0.04 z: 2.33

Left Controller
x: 0.00 y: 0.00 z: 0.00
qw: 1.00 qx: 0.00 qy: 0.00 qz: 0.00

Right Controller
x: -1.23 y: 0.07 z: 2.31
qw: 0.69 qx: 0.14 qy: 0.71 qz: -0.05

Body Tracker
x: -0.77 y: 0.50 z: 0.27

Left Feet Tracker
x: -0.23 y: 0.05 z: 1.53

Right Feet Tracker
x: -0.46 y: 0.06 z: 1.45
```

Figure 3.5 Présentation de l'application de capture de données

3.2.3 L'application d'analyse de données

L'application servant à analyser et à effectuer différents traitements sur les données a été développée avec le langage de programmation Python. Ce langage est actuellement l'un des plus populaires et possède une très grande communauté de développeurs. Il possède également plusieurs bibliothèques de code pour le calcul numérique et scientifique. En plus d'effectuer différents calculs sur les données, cette application a permis de générer les différents graphiques présentés dans cette étude, d'importer et d'exporter les données avec la base de données ainsi que d'entraîner et de tester les algorithmes d'apprentissage machine.

3.2.4 La base de données

Une base de données MySQL a été utilisée afin de classer et d'associer logiquement les différentes informations collectées dans le projet. Ces informations incluent les données des

différents capteurs (physiologiques et de mouvements), les données sur les participants ainsi que leurs réponses aux différents questionnaires.

La base de données a été créée avec le logiciel de modélisation MySQL Workbench ¹¹ et est hébergée localement sur l'ordinateur utilisé pour l'expérience à l'aide de la plateforme de développement Web WampServer ¹² qui inclut un serveur MySQL.

La Figure 3.3 et le Tableau 3.1 Descriptions des tables de la base de données Tableau 3.1 détaillent la base de données.

¹¹ <https://dev.mysql.com/downloads/workbench/>

¹² <http://www.wampserver.com/en>

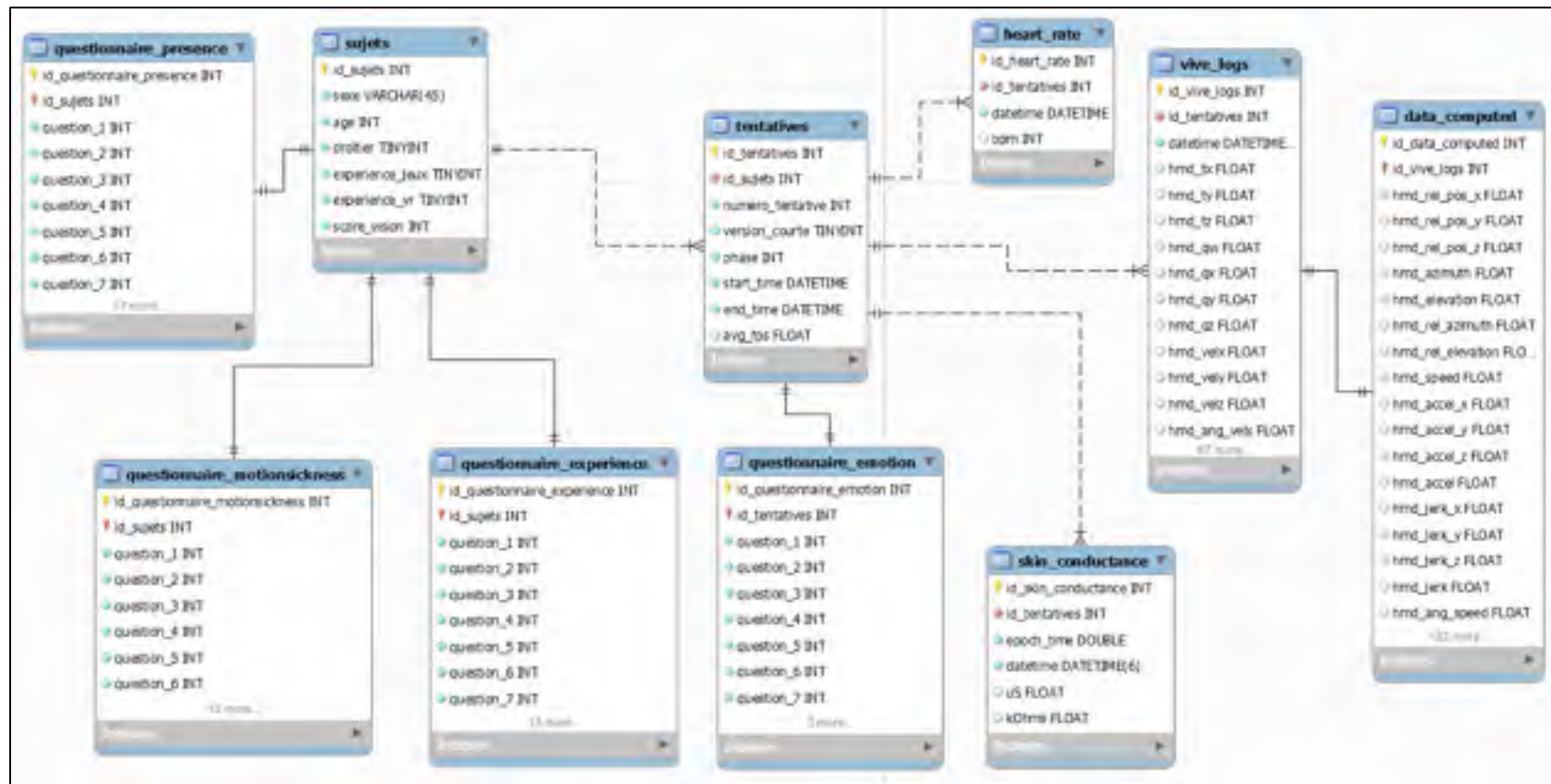


Figure 3.6 Aperçu du schéma de la base de données créé avec le logiciel MySQL Workbench

Tableau 3.1 Descriptions des tables de la base de données

Tables	Description
data_computed	Contiens toutes les informations calculées et dérivées à partir des données brutes.
heart_rate	Contiens toutes les mesures provenant du capteur de rythme cardiaque.
questionnaire_presence	Contiens les réponses de 1 à 7 pour chaque question du questionnaire sur l'état de présence.
questionnaire_motionsickness	Contiens la réponse de 0 à 3 pour chaque question du questionnaire sur les cybermalaises.
questionnaire_experience	Contiens les réponses de 1 à 7 pour chaque question du questionnaire sur l'analyse comportementale avec la réalité virtuelle
questionnaire_emotions	Contiens la réponse de 1 à 7 pour chaque question, pour chaque condition du questionnaire sur l'analyse émotionnelle avec la réalité virtuelle.
skin_conductance	Contiens toutes les mesures provenant du capteur mesurant l'activité électrodermale.
sujets	Contiens différentes informations sur les participants, comme le sexe, l'âge et leur expérience avec la réalité virtuelle.
tentatives	Contiens différentes informations sur chaque condition testée par les participants comme la date de début et de fin de cette expérience.
vive_logs	Contient toutes les données brutes provenant des capteurs de mouvement du système HTC Vive.

3.3 Participants

Le recrutement des participants s'est effectué à l'intérieur des locaux de l'École de Technologie Supérieure à Montréal durant l'été 2017, l'automne 2017 et l'été 2018, principalement en rencontrant des étudiants et par le biais d'invitations envoyées à la communauté étudiante via les réseaux sociaux. Pour tester un prototype précurseur à l'expérience #1, 5 participants (1 femme, 4 hommes), âgés entre 22 et 27 ans (moyenne de 24.6 ans, écart-type 2.41) ont été recrutés. Pour l'expérience #1, au total, 10 participants (2 femmes, 8 hommes), âgés entre 22 et 31 ans (moyenne de 25.9 ans, écart-type 4.1) ont été recrutés. Trois participants étaient gauchés et trois participants n'ont jamais essayé un casque de réalité virtuelle avant cette expérience. Pour l'expérience #2, au total, 12 participants (6 femmes, 6 hommes), âgés entre 21 et 30 ans (moyenne de 25.54 ans, écart-type 3.23) ont été recrutés. Un treizième participant a été recruté, mais ces données ont été écartées de l'étude à cause de problèmes d'enregistrement trop importants. Aucun des participants n'a rapporté des problèmes graves de vision, des problèmes musculaires ou des problèmes cardiovasculaires.

3.4 Design expérimental

Nous avons mené 2 expériences, chacune avec un design différent (Tableau 3.2). Dans chacune des deux expériences, il y a une condition conçue pour être stressante. Nous avons considéré s'il fallait donner à ces conditions un ordre fixe ou équilibré, et nous avons vu des avantages avec les deux approches. Par conséquent, chaque expérience adopte une approche différente. L'expérience #1 se déroule avec 4 conditions différentes dans un ordre fixe, pour mieux imiter l'arc de difficulté croissante d'un jeu vidéo et de l'acquisition d'expérience par les utilisateurs. L'expérience #2 utilise seulement 2 conditions, mais répète ces conditions dans 4 ordres possibles en répétant une condition trois fois. L'attribution d'un ordre à un utilisateur a été faite de façon aléatoire, mais l'objectif final était d'obtenir un nombre d'ordres égaux à analyser (12 utilisateurs → 4 ordonnancements différents, chacun affecté à 3 utilisateurs). Cet ordonnancement variable a été effectué pour empêcher les algorithmes d'apprentissage-machine d'exploiter une caractéristique qui pourrait être directement corrélée en fonction du temps. Par exemple, le rythme cardiaque pourrait augmenter au fur et à mesure que l'utilisateur

réalise les conditions. Ces deux designs différents permettent ainsi de comparer des caractéristiques et de vérifier leur variation dans le temps. Le fait d’avoir des tâches différentes et des conditions différentes dans chaque expérience augmente l’ensemble des expériences de réalité virtuelle pour lesquelles nous pouvons espérer obtenir des résultats similaires avec nos algorithmes d’apprentissage-machine, suggérant que notre approche pourrait se généraliser à d’autres situations. La tâche de l’expérience #1 implique des mouvements rapides et ciblés avec des limites de temps, tandis que dans l’expérience 2, il s’agit de mouvements rapides dans l’espace. Dans le cas des données de l’expérience #1, l’algorithme d’apprentissage automatique doit distinguer (i) les utilisateurs qui se déplacent rapidement et qui subissent un stress ou une surprise (condition 3) par rapport (ii) aux utilisateurs qui se déplacent rapidement, avec la même limite de temps et la même tâche à accomplir, mais avec moins de stress ou de surprise et plus d’expérience à exécuter la tâche motrice demandée (condition 4). Dans le cas des données de l’expérience #2, la condition induisant le stress se produit également comme une surprise, et se produit à un moment qui varie sur l’ensemble des utilisateurs (tôt pour certains utilisateurs, plus tard durant l’expérience pour d’autres), rendant plus difficile pour un algorithme d’apprentissage-machine distinguer de la condition calme.

Tableau 3.2 Ordre des différentes conditions pour chaque expérience

Expérience	Conditions à travers le temps				Ordre
#1	Condition de base	Calme	Stressante	Rapide	Fixe
#2	Stressante	Calme	Calme	Calme	Équilibré
	Calme	Stressante	Calme	Calme	
	Calme	Calme	Stressante	Calme	
	Calme	Calme	Calme	Stressante	

3.5 Déroutement des expériences

3.5.1 Invitation et accueil des participants

L'expérience avec les participants s'est déroulée dans un des locaux de l'École de Technologie Supérieure de Montréal avec l'approbation du comité d'éthique de l'établissement. Chacun des participants intéressés par l'expérience devait se présenter seul à une heure prédéterminée à ce local. Lors de l'envoi de l'invitation par courriel, il a été demandé aux participants de se vêtir avec des vêtements confortables permettant de se mouvoir facilement dans l'espace avec une mention spéciale demandant d'arriver avec des chaussures ayant des lacets, avec une préférence pour les chaussures de sport.

Lors de l'arrivée du participant, le projet est expliqué brièvement de même que les risques lors du remplissage d'un formulaire de consentement. Ensuite, un test de vision stéréoscopique est passé aux participants afin de vérifier s'il n'y a pas de problèmes à distinguer la profondeur des objets dans l'espace.

3.5.2 Test de vision stéréoscopique

Étant donné l'utilisation d'un casque de réalité virtuelle présentant une image différente pour chaque œil, il est nécessaire de s'assurer que tous les participants puissent gérer cette disparité binoculaire. Un test d'acuité visuelle stéréoscopique a donc été passé à tous les participants afin de vérifier qu'ils puissent bien distinguer la profondeur des objets dans l'espace.



Figure 3.7 Le test de vision stéréoscopique Titmus

Le test qui a été choisi est le test Titmus. C'est un petit livret comportant plusieurs images que l'on doit regarder avec des verres polarisés. Il permet de mesurer la disparité perçue par les participants dont l'unité de mesure s'exprime en secondes d'arc ($''$). D'abord, on demande au participant de tenir le livret à environ 40 cm et tenter de toucher les ailes d'une mouche qu'il perçoit en relief. Ce premier test permet de vérifier si le sujet a des problèmes majeurs avec sa vision. Les différentes parties de la mouche correspondent aux disparités suivantes:

Tableau 3.3 Disparité des sections de la mouche en seconde d'arcs

Section de la mouche	Secondes d'arcs
Aile droite	4800
Aile gauche	2500
Corps	3200
Yeux	3000

Ensuite, le sujet doit observer une série de 10 losanges comportant chacun 4 cercles dont un seul est perçu en relief. Ensuite, le sujet doit observer trois rangées de formes dont un seul est perçu en relief par rangée. Dans l'ordre, le sujet doit indiquer quel cercle semble être en relief par rapport aux autres. La disparité des cercles varie de 400 (grande disparité) à 20 secondes d'arc (faible disparité). Tous les participants ont bien perçu la mouche en relief. Pour les sujets ayant participé à l'expérience #1, le score moyen pour les 13 formes à identifier comme étant en relief sur les 10 participants est de 12.6 avec un écart-type de 0.70. Pour les 12 sujets ayant participé à l'expérience #2, le score moyen est de 11.75 avec un écart-type de 2.26.

3.5.3 Installation des capteurs et du casque sur le participant

Après avoir complété le test Titmus, il a été demandé au participant de rester assis afin d'installer les premiers capteurs de mouvements. Deux des capteurs sont utilisés pour identifier le mouvement des pieds. Ils sont attachés directement sur les souliers à travers les lacets de sorte qu'il y ait le moins d'occlusion possible avec les émetteurs infrarouges. Il est alors demandé au participant de se lever, de surélever un pied et d'effectuer des mouvements rapides afin de vérifier que le capteur soit bien fixé. La même procédure est alors répétée avec l'autre pied. Ensuite, le troisième capteur utilisé pour identifier les mouvements du bassin est fixé directement sur une ceinture attachée juste au-dessus des hanches à l'arrière du participant.



Figure 3.8 Un capteur Vive Tracker attaché correctement sur un soulier

La ceinture Polar H10 permettant de capter le rythme cardiaque du participant est alors installée sur le torse. Deux capteurs, permettant de récupérer la conductivité de la peau, sont fixés sur l'index et le majeur du participant, reliés au dispositif *Consensys GSR* attaché au poignet de la main non dominante. Vient alors le moment de positionner et d'ajuster le casque de réalité virtuelle sur la tête du participant en prenant bien soin de s'assurer que celui-ci soit confortable et que le poids du casque ne repose pas sur le nez tout en étant bien réparti sur l'ensemble du support sur la tête. Il est alors demandé d'effectuer des mouvements rapides de la tête de gauche à droite et de droite à gauche afin de vérifier que le tout soit bien fixé sur la tête. Le but de cette vérification est d'éviter qu'au cours de l'expérience, le participant aille à utiliser ses mains afin de réajuster ou de repositionner le casque sur sa tête, pouvant ainsi influencer les données de mouvement. On donne ensuite au participant une manette pour chaque main et on lui demande de confirmer visuellement si la manette gauche se trouve bien dans la main gauche et inversement pour la main droite. En effet, avant le début de l'expérience, l'utilisateur peut voir virtuellement les manettes se déplacer dans l'espace de même qu'un indicateur sur celles-ci permettant de confirmer si la manette est celle pour la main gauche ou la main droite au moyen d'une icône. Cette étape est nécessaire puisque c'est le logiciel qui détermine la main gauche ou droite selon leur position lors de l'initialisation.

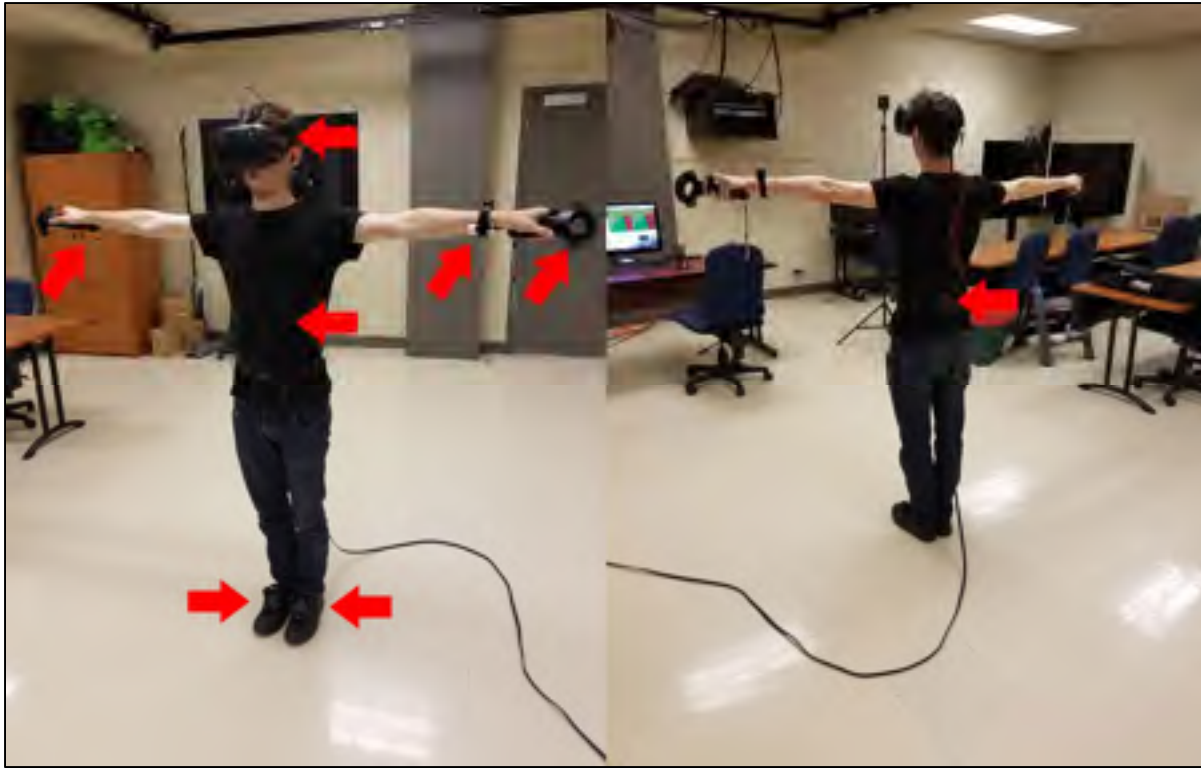


Figure 3.9 Position des différents capteurs sur un participant

3.5.4 Initier le participant aux déplacements dans l'espace et calibration

On demande ensuite au participant de marcher physiquement dans l'espace afin qu'il puisse prendre conscience des limites de la zone dédiée à l'expérience, notamment grâce au système « Chaperone » tel qu'expliqué précédemment. Une fois que le participant a exploré la zone, il lui est demandé de faire des rotations de 180 degrés afin de lui expliquer comment gérer le câble reliant le casque à l'ordinateur afin d'éviter de s'y enrouler. En effet, si un participant effectue un tour complet sur lui-même, le câble peut s'enrouler autour de lui et causer un problème dans ses mouvements. La prochaine consigne donnée au participant est d'effectuer une pose en « T » afin d'effectuer une calibration, notamment pour mesurer la grandeur du participant et la longueur des bras. Cette calibration est également utile comme mesure de référence dans le calcul des différents indices de données en lien avec les mouvements des utilisateurs.

3.5.5 Expérience #1

Chaque participant doit accomplir quatre séances de réalité virtuelle représentant quatre conditions associées à des comportements différents. Lorsqu'un participant est à l'aise avec les déplacements et que les capteurs sont bien fixés sur son corps, la capture des données démarre en même temps que la première séance de réalité virtuelle. Une fois que le participant complète une des conditions, il retourne s'asseoir afin de remplir un questionnaire tout en permettant à son rythme cardiaque de retourner à un niveau normal. De plus, deux points de vue de caméras sont enregistrés lors des séances de réalité virtuelle afin d'effectuer des vérifications post-expériences. Le premier point de vue est le même que le participant, c'est-à-dire la vue affichée à travers le casque de réalité virtuelle. Le second point de vue est positionné de sorte que l'on puisse observer l'ensemble des déplacements du corps virtuel représentant les différents capteurs du participant.

3.5.5.1 Condition #1 : Jeu d'observation dans un environnement boisé

L'objectif de la première condition est de mesurer l'activité du participant en effectuant une tâche sans aucune pression ou difficulté. Lors du démarrage de cette première expérience, le participant se retrouve dans un environnement virtuel calme représenté par un boisé en plein jour. L'environnement possède quelques effets sonores comme le bruit du vent et le bruit d'oiseaux. L'herbe au sol est également animée pour simuler un effet de vent. De plus, de nombreuses roches de différentes tailles (quelques centimètres à plusieurs mètres de circonférence) sont présentes dans l'environnement. Tous les arbres et les roches ont été positionnés de sorte qu'il soit possible de les observer à partir de la zone de déplacement limité par l'environnement physique.

La première tâche qui est demandée à un participant est de compter le nombre d'arbres dans l'environnement. Pour ce faire, le participant doit regarder autour de lui et doit se déplacer légèrement afin de percevoir des arbres pouvant être cachés par d'autres. L'environnement possède au total 29 arbres. La deuxième tâche demandée est de compter le nombre de roches

dans l'environnement. Le participant est informé que les roches peuvent avoir des tailles variées. L'environnement possède au total 16 roches.



Figure 3.10 Représentation de l'environnement de la condition #1

3.5.5.2 Condition #2 : Déplacer des prismes dans un environnement boisé

L'objectif de la deuxième condition est de mesurer le comportement du participant en effectuant une tâche répétitive sans élément stressant, mais avec une difficulté grandissante au fur et à mesure que l'utilisateur accomplit la tâche demandée. L'expérience se situe exactement dans le même environnement que la première condition, c'est-à-dire un environnement boisé et calme avec des bruits de vents et d'oiseaux. Il existe néanmoins une différence notable dans l'environnement, une table et un muret se sont ajoutés, précisément positionnés de sorte qu'ils soient accessibles aux extrémités de la zone de déplacement physique du participant.

La tâche qui est demandée aux participants pour cette condition est de récupérer des prismes de différentes formes (triangulaires, rectangulaires, pentagonales, etc.) situés sur la table et de

les insérer dans l'endroit correspondant à leur forme sur le muret. Le muret est composé de différents cubes ayant un trou correspondant à un des prismes disponibles sur la table. Pour se faire, le participant doit se déplacer vers la table, positionner une main virtuelle sur un prisme et garder la gâchette de la manette physique appuyée pour maintenir l'objet virtuel en main. Une fois l'objet virtuel sélectionné, le participant doit se déplacer vers le muret tout en gardant la gâchette enfoncée pour aller insérer le prisme dans le bon trou correspondant. Si le participant lâche la gâchette ou tente de faire passer le prisme à travers la table ou le muret, l'objet va automatiquement se dissocier de sa main virtuelle et tomber au sol. Celui-ci devra alors se pencher pour le récupérer et continuer l'expérience (Figure 3.11).

La tâche demandée se décompose en 4 niveaux, chacun ayant une difficulté distincte. Le premier niveau fait apparaître un seul prisme sur la table et un seul cube avec un trou de la même forme sur le muret. Le sujet doit alors récupérer l'unique prisme et l'insérer dans le trou. Le deuxième niveau est similaire, mais cette fois-ci, 4 prismes apparaissent et doivent être insérés dans le muret. De plus, le niveau de précision nécessaire pour insérer un prisme dans un trou est augmenté afin de rendre la tâche plus difficile. Ce niveau de précision pour l'insertion représente en fait le pourcentage du volume d'un prisme, calculé à partir de son centre, qui est utilisé pour gérer les collisions d'un prisme avec un autre objet. Par exemple, un niveau de précision de 50% fait en sorte que seulement 50% du volume du prisme à partir du centre sera utilisé pour calculer et gérer des collisions physiques avec d'autres objets. Ceci permet alors une plus grande marge de manœuvre pour le participant en lui permettant de déplacer un prisme légèrement à l'intérieur d'un autre objet avant de rencontrer une force bloquant son déplacement. Ainsi, à chaque fois que le niveau de précision nécessaire augmente, la marge de manœuvre diminue lors de l'insertion. En plus de réduire la marge de manœuvre, le deuxième niveau augmente la difficulté en introduisant un mouvement pour chacun des trous sur le muret. Les trous effectuent alors une rotation lente dans le sens des aiguilles d'une montre, de sorte que le trou soit toujours orienté vers la table, forçant le participant à adapter l'orientation de la pièce en conséquence pour l'insérer parfaitement. Le troisième niveau fait apparaître 9 prismes différents sur la table et 9 trous sur le muret tout en augmentant encore le niveau de précision nécessaire pour insérer les prismes et la vitesse de

rotation des trous. L'apparition de nouvelles formes augmente également le niveau de difficulté, car certains prismes sont très similaires et l'utilisateur peut donc tenter d'insérer un prisme dans un mauvais trou. Par exemple, il pourrait tenter d'insérer un prisme décagonal dans un trou dédié à au prisme dodécagonal à cause de leur similitude au niveau visuel. Enfin, le quatrième et dernier niveau de difficulté fait apparaître également 9 prismes sur la table et 9 trous sur le muret, mais ces trous se déplacement de façon aléatoire de gauche à droite et de haut en bas sur le muret. Le tableau suivant résume les différents facteurs contribuant au niveau de difficulté rencontrée par les utilisateurs.

Tableau 3.4 Paramètres des niveaux de difficulté de la tâche demandée

Niveau de difficulté	Nombre de prismes/trous	Niveau de précision pour l'insertion	Vitesse de rotation sur un axe	Déplacement aléatoire
1	1	50%	3 degrés/sec	Aucun
2	4	68.5%	5 degrés/sec	Aucun
3	9	80%	8 degrés/sec	Aucun
4	9	80%	8 degrés/sec	0.125 mètres/sec avec changement de direction aléatoire à tous les 0.8 secondes



Figure 3.11 Un participant lors de la deuxième condition

3.5.5.3 Condition #3 : Déplacer des prismes dans un environnement stressant

L'objectif de la troisième condition est très similaire à celui de la deuxième condition et consiste à effectuer la même tâche répétitive en récupérant des prismes sur une table et à les insérer dans un muret composé de différents trous. Les 4 niveaux de difficulté sont identiques à la deuxième condition et se produisent dans le même ordre, faisant en sorte que la tâche en elle-même n'est pas plus facile ou plus difficile. Cependant, l'environnement est différent. Le participant se trouve dans une pièce composée de murs et de plafonds blancs représentant un laboratoire dans l'espace. De plus, des éléments stressants sont ajoutés de façons prédéterminées et de façon graduelle dans l'expérience afin de générer du stress chez les participants. D'abord, le compte à rebours informe l'utilisateur qu'il doit dorénavant accomplir la tâche à l'intérieur d'un temps limite (3 minutes) pour réussir l'expérience. Puis, selon le temps restant, une série d'évènements va se produire pour générer du stress et capter l'attention du participant. La Figure 3.12 présente un participant s'approchant d'un muret lors de la 3^e condition. On peut observer le compte à rebours dans l'environnement et qu'aucun stresser n'est activé. La Figure 3.13 présente un participant qui tente d'insérer un prisme sur le muret. On peut observer des explosions à ce moment précis et qu'une partie de l'environnement a été

détruit. La présence de flamme et de fumée domine l'environnement, modifiant ainsi le comportement du participant. La liste d'événement est détaillée dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 Liste des évènements générés en fonction du temps restant pour accomplir la tâche

Temps restant	Événement de stress supplémentaire
2:00	Un son de "tic-tac" se fait entendre à chaque seconde pour rappeler que le temps s'écoule
1:30	Une voix annonce le temps restant
1:15	Une première alarme se met à sonner de façon continue
1:00	Une voix annonce le temps restant
0:55	Une explosion se produit, une partie des murs du laboratoire sont détruits, des flammes et de la fumée occupent l'environnement, des objets sont projetés en l'air en traversant l'environnement d'un côté à l'autre
0:45	De nouvelles flammes s'ajoutent dans l'environnement
0:30	De nouvelles flammes s'ajoutent dans l'environnement Une voix annonce le temps restant
0:15	Une deuxième alarme se met à sonner de façon continue
0:10	Une voix annonce le temps restant
0:00	Un bruit d'explosion se fait entendre L'écran devient noir Fin de l'expérience



Figure 3.12 Présentation de l'environnement de la 3e condition sans élément stressant.



Figure 3.13 Présentation de l'environnement de la 3e condition avec éléments stressants

3.5.5.4 Condition #4 : Déplacer des prismes avec un objectif de performance

La quatrième condition consiste toujours à déplacer des prismes dans le laboratoire spatial, mais sans les éléments stressants. Maintenant que le participant a été bien entraîné et qu'il est maintenant à l'aise d'effectuer la même tâche de déplacement des prismes avec les différents niveaux de difficulté, il lui est demandé cette fois-ci d'atteindre un objectif de performance, c'est-à-dire de terminer le plus rapidement possible la tâche demandée. Le compte à rebours est toujours présent afin d'offrir un indicateur à l'utilisateur. Cependant, il n'y a cette fois-ci aucune annonce rappelant le temps restant, ni d'éléments stressants tel que des explosions ou des flammes pour gêner l'utilisateur.

3.5.5.5 Choix et ordre des conditions

Les quatre conditions ont été choisies afin d'obtenir différentes réactions et états émotionnels chez les participants. La condition 1 est la condition de base. La condition 2 correspond à une excitation faible, alors que les conditions 3 et 4 correspondent à une excitation élevée (l'utilisateur doit effectuer des mouvements rapides dans les limites de temps). Toutes ces conditions ont été réalisées dans le même ordre pour chacun des participants. Ce choix est justifié pour plusieurs raisons. D'abord, la condition de base doit se réaliser en premier et la quatrième condition doit se réaliser en dernier, car elle nécessite que les participants aient acquis le plus d'expérience possible. Deuxièmement, un des objectifs était de reprendre le concept du « GameFlow » et d'imiter l'expérience des jeux vidéo, où la difficulté augmente graduellement jusqu'à ce que l'utilisateur atteigne un certain niveau de maîtrise et puisse réaliser les niveaux de difficulté plus avancés. Troisièmement, le but de l'étude n'était pas de comparer les conditions en soi, mais plutôt d'avoir des conditions qui induisent des comportements différents chez les participants, puis de mesurer la capacité des algorithmes de classification à reconnaître ces comportements. Le fait que les comportements aient pu être affectés par l'ordre des conditions n'enlève rien à l'objectif de cette étude. De plus, il est intéressant de noter qu'une étude précédente (Giakoumis *et al.*, 2009) utilisait un design avec la condition «ennuyeuse» toujours présentée comme la dernière condition, qui peut être justifiée par un raisonnement similaire.

3.5.5.6 Évolution de l'expérience suite à l'expérimentation d'un prototype

Les différents choix de conception et la définition des différentes conditions de l'expérience ont été influencés par les leçons apprises lors de l'expérimentation d'un prototype. Une première version a été développée avec Unity3D et incluait seulement l'environnement représentant le laboratoire dans l'espace. Cinq participants ont participé à l'expérience afin que l'on puisse évaluer le prototype et s'adapter en conséquence. Les participants devaient accomplir une version différente de la condition 3 présentée précédemment. Des stressseurs inattendus survenaient après une période de temps déterminés. Chacun des participants devait effectuer l'expérience quatre fois afin qu'il soit possible d'évaluer des variations entre chacune de ces tentatives.

Suite à l'évaluation de ce prototype, un élément de surprise a été supprimé : un mur laser. Ce mur s'affichait lors du 2^e niveau et du 4^e niveau de difficulté de l'expérience. Séparant la table sur laquelle les différents prismes sont déposés et le muret pour leur insertion, ce mur laser constituait une épreuve supplémentaire pour les participants. Si un prisme venait à toucher le mur, le prisme devenait noir et inactif, rendant son utilisation impossible. Un nouveau prisme apparaissait sur la table pour le remplacer. Pour permettre d'accomplir l'expérience, le mur pouvait se séparer temporairement (quelques secondes) en 2 sections afin de permettre aux participants de circuler d'un côté à l'autre de l'environnement avec les prismes avant de se fusionner à nouveau. Si le mur laser nécessitait une certaine coordination pour circuler avec les prismes, il n'empêchait pas le déplacement des participants. Lors de l'analyse des participants et des résultats, il a été décidé d'enlever cet obstacle, car celui-ci génèrait des comportements très différents d'un participant à l'autre. Certains participants hésitaient beaucoup trop à prendre des risques pour passer à travers l'ouverture temporaire dans le mur, alors que d'autres participants ont trouvé la stratégie de prendre tous les prismes et de les lancer à travers l'ouverture et ainsi éviter des déplacements. Si ces grandes différences au niveau du comportement étaient faciles à remarquer d'un participant à l'autre, elles nuisaient grandement à l'évaluation du niveau de stress causé par les autres stressseurs. Il a donc été décidé d'enlever

cet élément de l'expérience. La Figure 3.14 présente l'avatar complet (incluant les bras et les jambes) d'un participant qui traverse un mur laser lors du prototype de l'expérience #1.

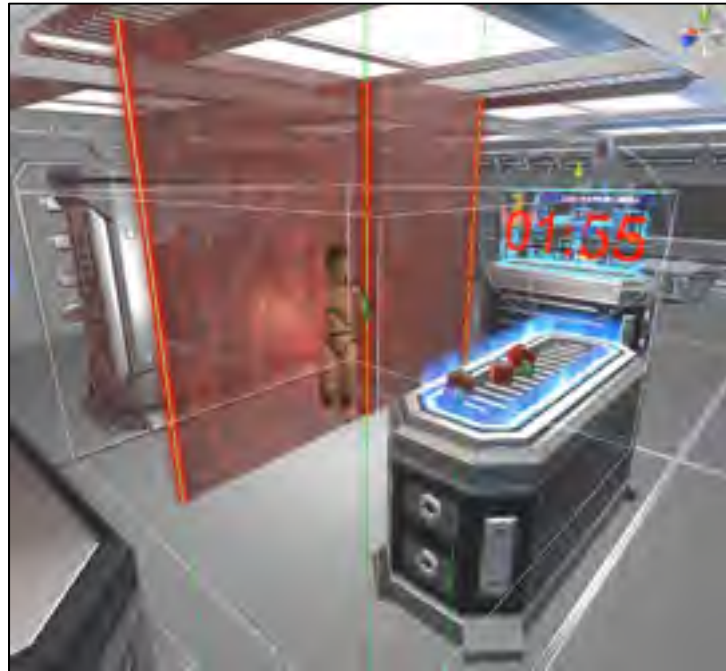


Figure 3.14 Mur laser lors du prototype

Une autre modification qui a été effectuée est en lien avec la représentation des participants au moyen d'un avatar. Initialement, ce projet prévoyait l'enregistrement d'avatars animés par les participants afin de vérifier s'il est également possible de déterminer le niveau de stress en observant ces animations. L'objectif était d'utiliser d'autres participants dont la tâche aurait été d'évaluer l'animation d'avatars et de les classer selon des niveaux de stress. Ceci aurait permis d'évaluer si une personne dans la réalité virtuelle est également capable de détecter le stress chez une autre personne représentée par un avatar dans le même environnement virtuel. L'animation des avatars était réalisée avec la capture des mouvements des participants au moyen des capteurs et par la cinématique inverse. Plutôt que de spécifier à la main un ensemble d'articulations, cette technique permet de déterminer ces paramètres à partir des composants significatifs tel que les mains et les pieds. Cependant, plusieurs des animations n'étaient pas réalistes à cause du manque de capteurs pour calculer différentes articulations comme les

genoux et les coudes. Cette représentation peu fiable de l'avatar a été éliminée et a été remplacée par la représentation simple de la tête, des mains, du bassin et des pieds dans l'environnement virtuel pour des fins de validation des données enregistrées. La Figure 3.15 présente un exemple d'animation erronée d'un avatar ne représentant pas correctement la position d'un participant, particulièrement pour les jambes et les bras.



Figure 3.15 Exemple d'animation erronée d'un avatar

3.5.6 Expérience #2

La deuxième expérience est similaire à la première expérience, mais demande aux utilisateurs d'exécuter une tâche motrice différente dans deux conditions. Les utilisateurs doivent toucher des cibles mobiles à l'aide de deux raquettes virtuelles, soit une raquette par main. Les utilisateurs utilisent le même matériel (casques et capteurs) que la première expérience et les dimensions de la zone jouable sont identiques à l'expérience #1. Les conditions ont été

expérimentées par les utilisateurs : une condition calme (C) et une condition stressante (S). La condition calme a été expérimentée trois fois pour chaque utilisateur et la condition stressante a été expérimentée une fois, comme surprise dans un ordre équilibré (voir le Tableau 3.2). Chacun des 4 ordres du tableau a été expérimenté par 3 utilisateurs pour un total de 12 utilisateurs. Après chacune des 4 conditions, les utilisateurs ont été invités à faire une pause. Ces pauses étaient plus longues que les pauses de l'expérience #1, et le rythme cardiaque de chaque utilisateur était surveillé pendant chaque pause, pour s'assurer qu'il soit revenu à un niveau de référence avant que l'utilisateur ne puisse passer à la condition suivante.

3.5.6.1 Condition C : Calme

Dans la condition C, les utilisateurs ont été placés dans le même environnement virtuel que la condition 1 de l'expérience #1, soit dans une forêt virtuelle à la lumière du jour avec des sons de vent et d'oiseaux. Les utilisateurs ont été invités à frapper 50 cibles mobiles (volant en place avec une déviation aléatoire) représentées par des papillons bleus générant un bruit lorsqu'ils sont touchés. Chaque cible apparaît dans un endroit prédéfini autour de l'utilisateur. Au début, les cibles apparaissaient une après l'autre lorsque que la cible précédente est touchée. Après avoir touché 25 cibles, les cibles suivantes apparaissent par paires simultanément. Après que 40 cibles ont été touchées, 3 cibles apparaissent de façon simultanément jusqu'à ce que les 50 cibles soient générées. La Figure 3.16 présente l'environnement de la condition C, où l'utilisateur doit frapper des papillons bleus dans une forêt virtuelle en plein jour.



Figure 3.16 Un utilisateur lors de l'expérience #2, condition C

3.5.6.2 Condition S : Stressante

Dans la condition S, les utilisateurs se retrouvent dans la même forêt virtuelle, mais durant la nuit. Ils peuvent entendre des bruits étranges, des loups qui hurlent et des gens qui crient au loin. En plus, des monstres apparaissent au loin en regardant directement l'utilisateur, puis disparaissent sans faire de bruit lorsque l'utilisateur détourne le regard. Au fur et à mesure que la condition progresse, un monstre apparaît de plus en plus près de l'utilisateur, comme s'il se rapprochait. Il n'y a aucune interaction possible avec les monstres dans l'environnement, ils sont présents seulement pour induire la peur. Les 50 cibles mobiles sont maintenant représentées par des abeilles faisant des bourdonnements, avec deux états possibles: quand une abeille est jaune, elle est inoffensive, mais après 3 secondes suite à son apparition, si elle est encore en vie, une abeille devient rouge et commence à tirer des dards vers l'utilisateur. Si l'utilisateur est frappé par un dard, l'ensemble du champ de vision de l'utilisateur devient rouge pendant une demi-seconde. Il est important de noter que le positionnement initial des abeilles durant la condition S et le positionnement des papillons durant la condition C sont exactement les mêmes. Le nombre d'insectes est aussi identique dans les deux conditions, et les mouvements requis de l'utilisateur pour éliminer ces insectes sont semblables. Seuls les retours

audio et visuel sont différents entre ces deux conditions, avec l'intention de rendre la condition S plus stressante, induisant éventuellement des mouvements plus rapides et plus paniqués chez l'utilisateur. La Figure 3.17 présente l'environnement de la condition S, où l'utilisateur doit frapper des abeilles dans une forêt virtuelle la nuit tout en étant entouré de plusieurs monstres.



Figure 3.17 Un utilisateur lors de l'expérience #2, condition S

3.6 Mesures

Pour cette étude, 3 types de mesures ont été enregistrés: les mesures de mouvements, les mesures physiologiques et les mesures subjectives.

3.6.1 Les mesures de mouvements

Les mesures de mouvements correspondent aux mesures directes et indirectes des mouvements des participants à travers les différents capteurs fournis par le système HTC Vive. La position dans l'espace (X, Y, Z), la rotation (quaternion: w, x, y, z), la vitesse en m/s (x, y, z) et la vitesse angulaire en rad/s (x, y, z) ont été récupérées à une fréquence 100 Hz pour les capteurs suivants:

- Le casque de réalité virtuelle (tête);
- Le contrôleur gauche (main gauche);
- Le contrôleur droit (main droite);
- Un capteur « Vive Tracker » sur la ceinture (bassin);
- Un capteur « Vive Tracker » sur le pied gauche;
- Un capteur « Vive Tracker » sur le pied droit.

À partir de ces informations, des nouvelles mesures ont été calculées. Pour chaque capteur, on a calculé la position relative à la position moyenne provenant de tous les capteurs, la vitesse (magnitude de la vitesse dans les 3 dimensions (x, y, z)), l'accélération pour chaque dimension (x, y, z), le jerk (dérivé de l'accélération) dans les 3 dimensions (x, y, z), l'azimut et l'élévation (relatifs à la moyenne de la direction avant de tous les capteurs), la vitesse angulaire (magnitude de la vitesse angulaire dans les 3 dimensions (x, y, z)), l'accélération angulaire (dérivé de la vitesse angulaire) dans les 3 dimensions (x, y, z) et le jerk angulaire (la dérivé de l'accélération) dans les 3 dimensions (x, y, z).

En plus de ces mesures, d'autres mesures indirectes ont été calculées. Plusieurs de ces mesures sont inspirées de l'étude de Piana (Piana, Staglianò, Camurri, & Odone, 2013) qui a analysé l'ensemble des mouvements du corps pour la détection d'émotions chez les enfants autistes.

Les sections suivantes détaillent ces mesures indirectes, c'est-à-dire les mesures qui ont été calculées à partir des mesures provenant des capteurs.

3.6.1.1 L'azimut et l'élévation

L'azimut représente la direction d'un capteur en angle sur le plan horizontal (le sol) par rapport à une direction d'origine (0°) identique pour tous les utilisateurs. Pour cette étude, l'azimut se mesure de -180° (exclu) à 180° (inclus). Ainsi, un utilisateur qui effectue une rotation de 0° (direction d'origine) à -90° , effectue en fait une rotation vers la gauche de 90° .

L'élévation représente l'angle formé entre la direction d'un capteur par rapport au plan horizontal (le sol). Cet angle est positif lorsqu'un capteur pointe une direction au-dessus du plan horizontal et est négatif lorsqu'il pointe sous ce plan horizontal. Pour cette étude, l'élévation se mesure de -90° à 90° (zénith).

De plus, pour chaque capteur, on a calculé l'élévation et l'azimut relative par rapport à l'élévation et l'azimut moyen de tous les capteurs. Ce calcul d'angle relatif permet de détecter par exemple si un utilisateur pointe l'ensemble de son corps (ex : pieds, tête, bassin) vers l'avant, mais pointe vers l'arrière avec une main ou une autre partie du corps. Ainsi, on peut déterminer qu'il y a une grande différence dans la direction de cette main ou de ce capteur spécifique par rapport à l'orientation du reste du corps de l'utilisateur.

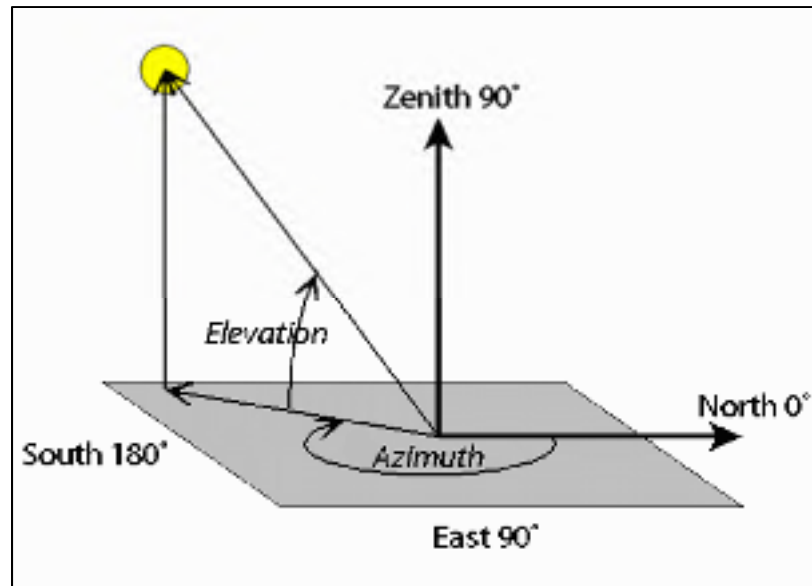


Figure 3.18 Représentation graphique de l'élévation et de l'azimut¹³

3.6.1.2 L'énergie cinétique

Une mesure indirecte calculée à partir des mouvements des participants est l'énergie cinétique totale. C'est la somme de l'énergie dépensée par un participant lors des mouvements en calculant les déplacements de tous les capteurs du système de réalité virtuelle. Parfois nommée "quantité de mouvement", cette valeur peut servir à différencier certaines émotions. Des valeurs d'énergies élevées sont associées à des émotions fortes comme la colère, la joie ou la peur, alors que des valeurs faibles sont associées avec la tristesse et l'ennui. La formule de l'énergie cinétique est la suivante:

$$E(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \text{masse}_i \cdot \text{vitesse}(t)_i^2 \quad (3.1)$$

¹³ https://www.celestis.com/media/3811/az_elevation.jpg

Où i représente un capteur, et où la vitesse est calculée par la formule suivante:

$$\text{vitesse}(t) = \sqrt{x'(t)^2 + y'(t)^2 + z'(t)^2} \quad (3.2)$$

La masse utilisée pour ce calcul varie en fonction des capteurs du système de réalité virtuelle HTC Vive. La masse du casque est de 555g, celle des contrôleurs est de 203g et celle des Vive trackers est de 85g.

3.6.1.3 Courbure des mouvements

La courbure des mouvements est une autre mesure qui est calculée en fonction de la vitesse et de l'accélération des différents capteurs dans les trois dimensions de l'espace. Elle indique le niveau d'incurvation. Plus le rayon de courbure est élevé, plus le tracé se rapproche d'une ligne droite, et inversement. De façon plus précise, c'est l'inverse de la mesure du rayon du cercle osculateur, c'est-à-dire le cercle qui épouse la courbe le mieux possible pour un point donné le long de la trajectoire d'un mouvement. Par exemple, un mouvement en ligne droite serait représenté par une courbure de 0 alors qu'un mouvement en effectuant des petits cercles aura plutôt une courbure élevée. La Figure 3.19 présente un exemple de trajectoire de mouvement identifiée par la courbe C, où le point analysé est identifié par P et où le rayon du cercle osculateur est identifié par r. La formule de la courbure utilisée est la suivante:

$$k(t) = \frac{\sqrt{(x' \cdot y'' - y' \cdot x'')^2 + (z' \cdot x'' - x' \cdot z'')^2 + (y' \cdot z'' - z' \cdot y'')^2}}{(x'^2 + y'^2 + z'^2)^{3/2}} \quad (3.3)$$

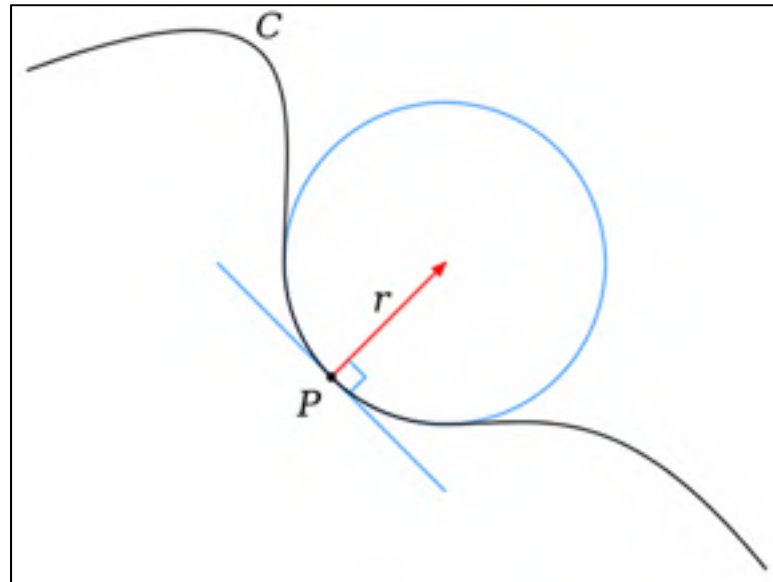


Figure 3.19 Exemple de rayon de courbure sur d'une trajectoire de mouvement.¹⁴

3.6.1.4 La symétrie des mouvements

Plusieurs études se sont intéressées à l'asymétrie des mouvements du visage et du corps en lien avec les émotions en suggérant qu'il existe une dominance d'un hémisphère du cerveau dans le contrôle des émotions. L'étude de Roether (Roether, Omlor, & Giese, 2008) démontre qu'une marche expressive dégageant des émotions a tendance à être plus asymétrique qu'une marche neutre. Il est donc intéressant d'analyser la symétrie entre les deux mains et les deux pieds par rapport à la position de la tête. Les symétries partielles (SI_x , SI_y , SI_z) sont calculées avec les formules suivantes, où i représente un capteur:

$$SI_{xi} = 1 - \frac{||x_{Gi}-x_{Ti}|-|x_{Di}-x_{Ti}||}{|x_{Gi}-x_{Ti}|+|x_{Di}-x_{Ti}|} \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (3.4)$$

¹⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Curvature#/media/File:Osculating_circle.svg

$$SI_{yi} = 1 - \frac{||y_{Gi}-y_{Ti}|-|y_{Di}-y_{Ti}||}{|y_{Gi}-y_{Ti}|+|y_{Di}-y_{Ti}|} \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (3.5)$$

$$SI_{zi} = 1 - \frac{||z_{Gi}-z_{Ti}|-|z_{Di}-z_{Ti}||}{|z_{Gi}-z_{Ti}|+|z_{Di}-z_{Ti}|} \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (3.6)$$

Les coordonnées X_t, Y_t, Z_t représentent la tête, X_g, Y_g, Z_g représentent les coordonnées des éléments de la partie gauche du corps (main gauche et pied gauche) et X_b, Y_b, Z_b représentent les coordonnées des éléments de la partie droite du corps (main droite et pied droit). Chaque indice de symétries partiel va donner un résultat entre 0 et 1, où 0 est une asymétrie complète et 1 est une symétrie parfaite. Ensuite, on calcule une moyenne pour chaque symétrie partielle:

$$SI_x = \frac{\sum_{i=0}^n SI_{xi}}{n} \quad SI_y = \frac{\sum_{i=0}^n SI_{yi}}{n} \quad SI_z = \frac{\sum_{i=0}^n SI_{zi}}{n} \quad (3.7)$$

Enfin, on combine ces trois moyennes afin d'obtenir un indice de symétrie globale représentant la moyenne de tous les axes:

$$SI = \frac{SI_x + SI_y + SI_z}{3} \quad (3.8)$$

Tout comme les indices de symétries partiels, l'indice global va donner un résultat entre 0 et 1, où 0 est une asymétrie complète et 1 est une symétrie parfaite.

$$0 \leq SI \leq 1 \quad (3.9)$$

Dans la Figure 3.20, dans l'image de gauche, les deux bras sont étendus de chaque côté du casque, ce qui donne une symétrie élevée sur l'axe X (près de 1). Dans la deuxième image, un bras est plus rapproché du casque sur l'axe X, ce qui donne un plus faible indice de symétrie

sur l'axe X (près de 0.66). Dans la troisième image, les bras sont étendus du même côté du casque sur l'axe X, ce qui donne une symétrie élevée sur cet axe (près de 1).



Figure 3.20 Exemples de mesure de la symétrie des mouvements

3.6.1.5 Le volume de la boîte englobante

Le mesure du volume de la boîte englobante permet d'obtenir de l'information à propos de l'espace qu'occupe un participant dans l'espace. La boîte englobante est la plus petite boîte alignée sur les axes permettant de contenir tous les capteurs dans l'espace. Plus une personne est refermée sur elle-même, plus petit sera le volume de la boîte alors qu'à l'inverse, plus une personne va étendre ses membres loin de son corps, plus le volume de la boîte sera grand. Le volume de la boîte est calculé à partir de la longueur des plus grands segments possible sur chaque axe pour chaque capteur:

$$V(t) = (MaxX(t) - MinX(t)) \cdot (MaxY(t) - MinY(t)) \cdot (MaxZ(t) - MinZ(t)) \quad (3.10)$$

Les variables MaxX, MaxY et MaxZ représentent les positions X,Y,Z les plus élevés parmi tous les capteurs alors que les variables MinX, MinY et MinZ représentent les positions X,Y,Z les plus faibles parmi tous les capteurs. La Figure 3.21 présente un exemple de la position d'un corps générant une boîte ayant un volume élevé et une position générant une boîte ayant un faible volume.



Figure 3.21 Exemple de volume de la boîte englobante

3.6.2 Les mesures physiologiques

Les mesures physiologiques correspondent aux informations fournies directement par le corps des participants. Deux mesures physiologiques ont été captées pour cette expérience: le rythme cardiaque et l'activité électrodermale. Le rythme cardiaque est calculé à partir de l'enregistrement de l'activité électrique du cœur à partir des électrodes placées sur la peau. La ceinture Polar H10 est utilisée pour effectuer cette capture à une fréquence de 60 Hz. Le rythme cardiaque d'une personne peut être influencé par plusieurs événements comme: le stress, la peur, les émotions, etc. De façon générale, le rythme cardiaque va augmenter lors d'une situation stressante et va diminuer lors d'une situation relaxante. Le même phénomène va se produire avec des émotions positives (augmentation du rythme) et des émotions négatives (diminution du rythme) (Lang, Greenwald, Bradley, & Hamm, 1993; Meehan, Insko, Whitton, & Brooks Jr, 2002). La fenêtre de Hamming a été appliquée aux données du capteur afin de réduire le bruit occasionné par les mouvements du participant. Cette fenêtre est une méthode de transformation par moyenne mobile pondérée qui permet de lisser les valeurs d'un signal et ainsi réduire le bruit.

L'activité électrique biologique enregistrée à la surface de la peau est mesurée à une fréquence de 50 Hz en envoyant un petit signal électrique sur un doigt et en captant le retour sur un autre doigt pour mesurer la résistance et ainsi déduire la conductivité du courant (l'inverse de la résistance). Cette conductivité augmente selon le niveau de sudation de la peau qui peut être influencé positivement par des éléments stressants ou inattendus. Tout comme les données du rythme cardiaque, la fenêtre de Hamming a été appliquée aux données du capteur afin de réduire le bruit pouvant être généré dans le signal électrique enregistré.

Tableau 3.6 Capteurs physiologiques et unités de mesure

Capteurs	Donnée	Unité de mesure
Consensys galvanic skin response sensor (≈50 Hz)	Résistance de la peau	Kiloohms (kΩ)
	Conductivité de la peau	Microsiemens (μS)
Polar H10 heart rate sensor (≈60 Hz)	Rythme cardiaque	Battement par minute (bpm)

3.6.3 Les mesures subjectives

Les mesures subjectives proviennent de la perception même de l'expérience par les participants, en répondant à des questionnaires après chaque séance de réalité virtuelle. Au total, 4 questionnaires différents ont été utilisés dans cette expérience. Le premier questionnaire est une traduction française du questionnaire de Witmer et Singer pour mesurer l'effet de présence (Witmer & Singer, 1998). Le deuxième questionnaire est une traduction française d'un questionnaire pour mesurer les cybermalaises (Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993). Ces traductions proviennent du laboratoire de Cyberpsychologie de l'Université du Québec en Outaouais. Les deux autres questionnaires ont été conçus sur mesure pour cette expérience. Le premier questionnaire (20 questions) permet d'évaluer l'expérience globale du participant après avoir complété toutes les conditions. Le deuxième questionnaire (10 questions) permet de faire l'analyse émotionnelle du participant après chaque condition. Les questions de ces deux derniers questionnaires (annexe 1 et annexe 2) utilisent l'échelle de

Likert en 7 points et ont été inspirées par les questionnaires utilisés dans l'étude de Jennett (Jennett *et al.*, 2008).

3.7 Comparaison des algorithmes de classification

À partir de la masse de données accumulées, il est alors possible d'entraîner et de tester plusieurs algorithmes d'apprentissage machine afin d'effectuer une comparaison de leur performance et déterminer quel algorithme semble être le plus performant pour la classification de différents comportements.

3.7.1 Classification pour tous les participants

Afin de déterminer quels algorithmes de classification offrent la meilleure performance à partir du jeu de données disponible, des tests de classifications ont été effectués sur une dizaine d'algorithmes. Cependant, puisque l'expérience a permis de récupérer plus d'un million d'échantillons de données, il est aussi intéressant de vérifier avec quel intervalle de temps, sur laquelle une moyenne a été calculée, les performances s'améliorent. L'Algorithme 3.1 a été utilisé comme technique d'évaluation:

Algorithme 3.1 Entraînement et test des classificateurs

Pour chaque intervalle de temps (1s, 5s, 10s, 30s, 60s, 120s, 240s, 480s):
 Pour chaque classificateur (10 classificateurs)
 On répète 10 fois le processus suivant:
 On divise les données de façon aléatoire à 70% pour l'entraînement et 30% pour tester
 On effectue un test de classification et obtient un résultat
 On récupère les 10 résultats et on fait une moyenne pour ce classificateur
 On récupère toutes les moyennes de chaque classificateur pour cet intervalle et on obtient un score moyen
On récupère les moyennes pour tous les intervalles testés afin d'évaluer l'évolution des classificateurs en fonction du changement d'intervalles

L'intervalle de temps détermine la taille temporelle d'un échantillon. Par exemple, une analyse avec un intervalle de temps de 1 seconde sera composée de plusieurs segments dont les données auront été moyennées sur une durée de 1 seconde.

Étant donné que les données sont divisées de façon aléatoire entre l'entraînement et le test, les résultats de performances peuvent varier d'un test à l'autre. Pour contrer cet effet, le processus est répété une dizaine de fois pour chaque classificateur et ce pour chaque intervalle de temps afin d'obtenir un score de performance moyennant tous ces résultats.

Les classificateurs utilisés dans l'expérience sont les suivants: logistic regression (malgré son nom, c'est un modèle linéaire), linear support vector, Gaussian naive Bayes, AdoBoost, decision tree, extremely randomized tree classifier, K-nearest neighbors, nearest centroid, label propagation et le multi-layer perceptron. Idéalement, on veut comparer le plus grand nombre d'algorithmes, mais le choix de s'arrêter à 10 est limité par temps nécessaire pour tous les implémenter. Tous ces algorithmes de classifications proviennent de la librairie Python scikit-learn 0.19.0¹⁵.

3.7.2 Utilisation de zones tampons pour l'entraînement des algorithmes

Lors de l'évaluation de nos algorithmes, l'ensemble des données capturées sont séparées entre un groupe d'entraînement (70% des données) et un groupe de tests (30% des données). Un échantillon de données testé peut donc être comparé à un autre échantillon de données provenant d'un même utilisateur utilisé pour l'entraînement des algorithmes. Il est donc parfois possible qu'une donnée testée soit très proche temporellement d'une donnée entraînée si l'intervalle de temps est très court, permettant ainsi d'identifier facilement la condition associée aux informations testées.

¹⁵ <https://pypi.python.org/pypi/scikit-learn/0.19.0>

Sur la Figure 3.22, on peut observer qu'il est possible qu'un échantillon testé soit très près d'un autre échantillon ayant servi à l'entraînement sur une dimension donnée. Cela peut donner un avantage injuste à l'algorithme d'apprentissage machine.

La Figure 3.23 présente l'utilisation d'une zone tampon entre les données entraînées et les données testées afin d'éviter de comparer des échantillons trop similaires.

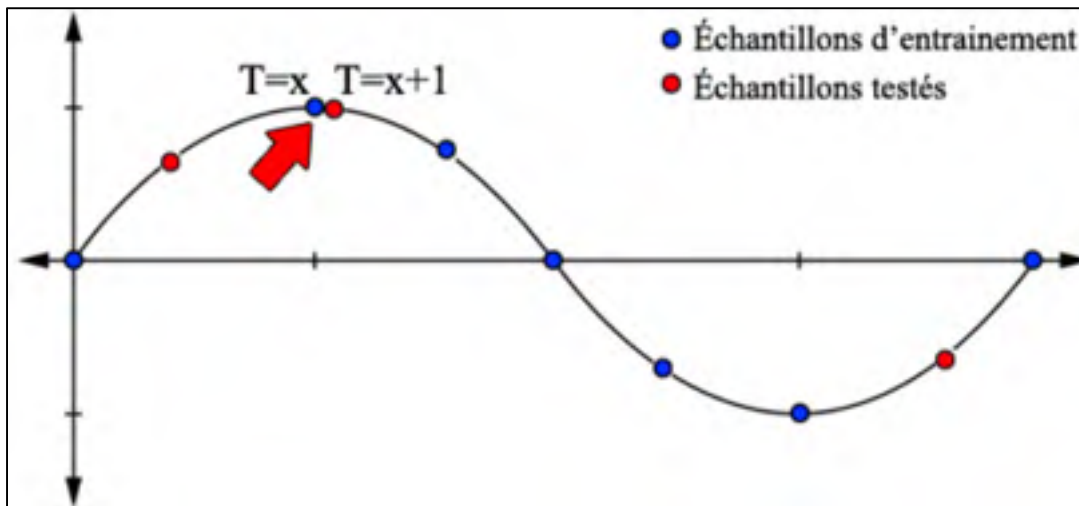


Figure 3.22 Échantillon testé trop près d'un échantillon ayant servi à l'entraînement

Pour éviter toute possibilité pouvant offrir un avantage injuste aux algorithmes d'apprentissage machine, la distribution des données entre l'entraînement et les tests de ces algorithmes a été revue pour l'expérience #2. Des tampons temporels ont été ajoutés entre les données utilisées pour l'entraînement et les données utilisées pour les tests afin d'éviter de tester un échantillon provenant d'un instant trop près de la donnée utilisée pour l'apprentissage. Ces tampons séparent les données d'au moins 4 secondes afin de s'assurer de bien séparer les gestes des participants.

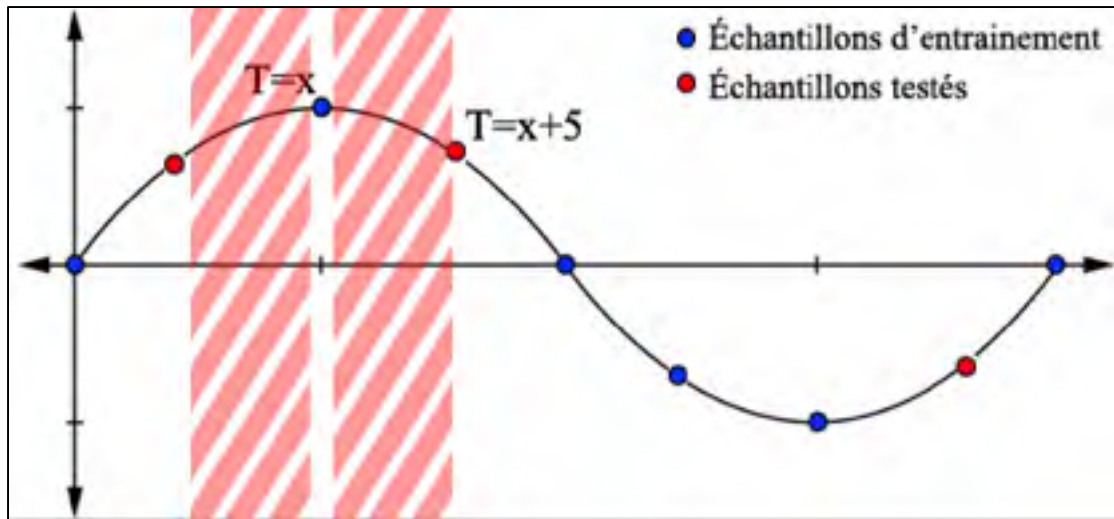


Figure 3.23 L'utilisation d'une zone tampon entre les données entraînées et ceux testées

3.8 Évaluation de l'importance des mesures

Les mesures de mouvements et les mesures physiologiques sont des caractéristiques utilisées pour entraîner et tester les classificateurs. Cependant, toutes les caractéristiques n'offrent pas la même contribution aux algorithmes. Certaines caractéristiques peuvent faciliter la classification et d'autres peuvent nuire à la classification. Il est donc utile d'évaluer ces caractéristiques afin de faire une sélection des données permettant soit d'améliorer le score des classificateurs, soit pour améliorer leurs performances.

Afin de mesurer l'importance de ces caractéristiques, les algorithmes de classification basés sur les arbres de décision sont utilisés. Chaque nœud dans les arbres de décision est une condition sur une seule caractéristique, conçue pour diviser l'ensemble des données en deux afin que les réponses similaires se retrouvent dans le même ensemble. Chaque condition utilise une mesure pour effectuer une décision. Cette mesure est l'impureté de Gini, aussi nommée: le coefficient de Gini. Ainsi, lors de l'entraînement de l'arbre de décision, il est possible de calculer à quel point chaque caractéristique diminue l'impureté pondérée dans l'arbre et ainsi de déterminer son importance dans la classification. Cependant, l'importance peut être biaisée dans le cas où certaines caractéristiques peuvent être fortement corrélées. N'importe laquelle

de ces caractéristiques corrélées peut être utilisée comme prédicteur et l'importance des autres caractéristiques peut donc se trouver significativement réduite. C'est que l'impureté qu'ils peuvent enlever est déjà supprimée par la première caractéristique évaluée. En conséquence, les caractéristiques qui sont corrélées avec la première qui aura été évaluée auront une importance moindre alors qu'elles devraient être pratiquement équivalentes. C'est pour cette raison que notre évaluation de l'importance de ces caractéristiques, et donc de nos mesures, s'effectue en trois temps: l'évaluation incluant les mesures physiologiques et de mouvements (1), l'évaluation de l'ensemble des mesures de mouvements (2), l'évaluation des mesures de mouvements incluant seulement le haut du corps (3). Ces trois types d'évaluation permettent d'obtenir des résultats différents en variant le nombre de caractéristiques testées et ainsi l'importance qui peut être attribuée à ceux-ci. De cette façon, il est possible de déterminer si une caractéristique se distingue vraiment dans chacune des situations.

L'évaluation de l'importance basée sur le calcul de l'impureté de Gini est disponible avec la librairie Python scikit-learn pour l'algorithme d'arbre de décision extrêmement aléatoire. Notre mesure de l'importance s'est faite à partir d'échantillons de données moyennés sur une durée de 1 seconde. La valeur d'importance associée à chaque caractéristique est normalisée pour ainsi obtenir une importance relative par rapport aux autres caractéristiques.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 Résultats de l'expérience #1

4.1.1 Les résultats des mesures subjectives

4.1.1.1 Questionnaire d'analyse émotionnelle par condition

Les réponses aux questionnaires sur l'analyse émotionnelle après chaque séance de réalité virtuelle permettent de vérifier comment les participants ont perçu différemment chacune des conditions testées au niveau psychologique. Pour ce questionnaire, 40 réponses ont été collectées pour chaque participant (10 questions \times 4 conditions) pour un total de 400 réponses au total. Les graphiques et tableaux suivants représentent la répartition des réponses de ce questionnaire sur une échelle de 1 à 7 ainsi que les moyennes et écarts-types pour chaque condition : jeu de recherche (condition 1), jeu calme (condition 2), jeu stressant (condition 3) et performance (condition 4). Les figures et tableaux suivants présentent les résultats de ce questionnaire pour l'expérience #1.

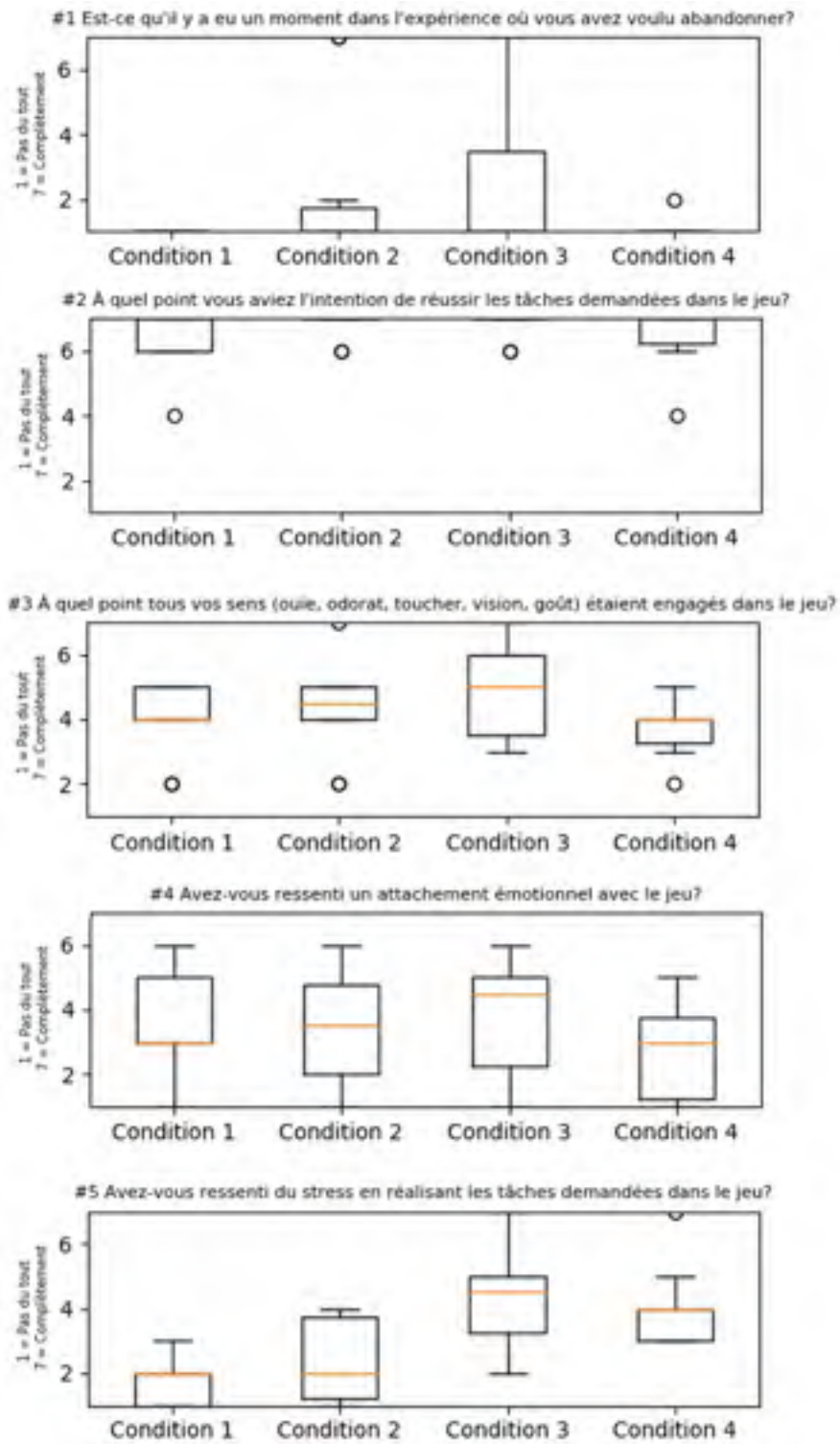


Figure 4.1 Diagrammes en boîte à moustache pour les questions #1 à #5 du questionnaire d'analyse émotionnelle par condition

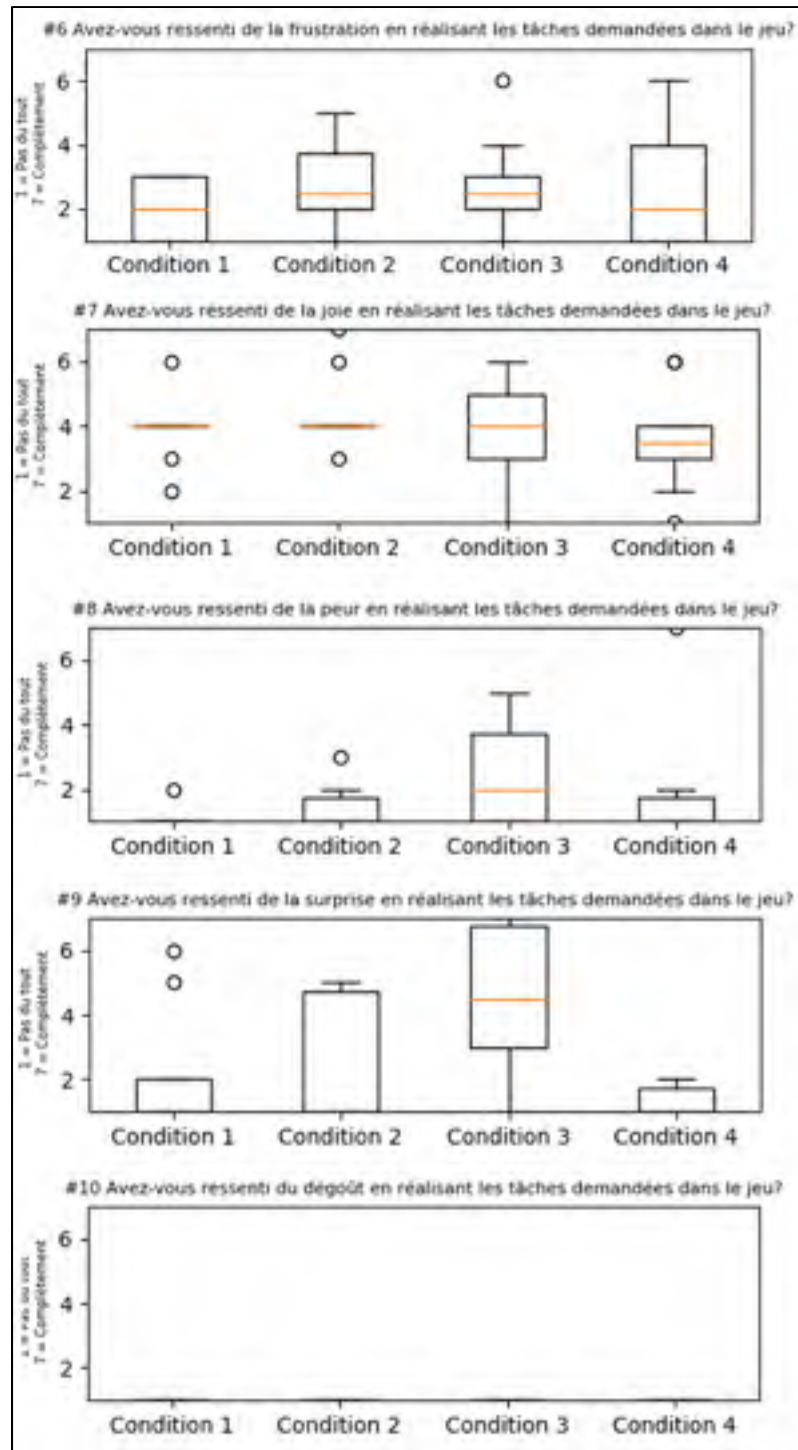


Figure 4.2 Diagrammes en boîte à moustache pour les questions #6 à #10 du questionnaire d'analyse émotionnelle par condition

Tableau 4.1 Moyennes (écarts-types) des réponses aux questionnaires sur l'analyse émotionnelle

Questions	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
Question 1	1.00 (0.00)	2.30 (2.47)	2.59 (2.50)	1.10 (0.32)
Question 2	6.33 (0.42)	6.80 (0.42)	6.80 (0.42)	6.50 (0.97)
Question 3	3.88 (1.16)	4.30 (1.49)	4.90 (1.44)	3.80 (0.92)
Question 4	3.66 (1.66)	3.40 (1.90)	3.79 (1.83)	2.70 (1.42)
Question 5	1.66 (0.71)	2.40 (1.26)	4.40 (1.51)	4.00 (1.25)
Question 6	1.88 (0.92)	2.80 (1.48)	2.80 (1.40)	2.70 (1.89)
Question 7	3.88 (1.04)	4.40 (1.17)	3.90 (1.66)	3.60 (1.58)
Question 8	1.11 (0.33)	1.40 (0.70)	2.40 (1.51)	1.80 (1.87)
Question 9	2.22 (1.92)	2.50 (1.96)	4.60 (2.11)	1.30 (0.48)
Question 10	1.00 (0.00)	1.00 (0.00)	1.00 (0.00)	1.00 (0.00)

Les scores sur l'échelle de Likert ont été analysés en utilisant le test de « Kruskal-Wallis chi-squared ». Lorsque les résultats indiquaient une différence significative, une comparaison post hoc a été effectuée en utilisant le test Dunn et l'ajustement de Benjamini-Hockberg afin d'identifier les moyennes qui ont contribué à l'effet, c'est-à-dire, connaître les conditions qui sont particulièrement différentes les unes des autres.

Dans un premier temps, on peut remarquer que les défis proposés aux participants étaient suffisants sans être trop intense puisque la volonté d'abandonner était faible dans la plupart des conditions testées. Il n'y a pas de différence significative pour la volonté d'abandonner entre les conditions ($p < 0.09$). Il est tout de même possible de remarquer qu'aucun participant n'a eu la moindre intention d'abandonner lors de la première condition ($M=1$, $SD=0$) alors que cette intention était légèrement plus élevée pour la condition 3 ($M=2.59$, $SD=2.50$). De façon générale, l'intention moyenne des participants était assez élevée pour toutes les conditions sans différence significative entre ces conditions ($p < 0.64$). Les participants ont jugé que leurs sens étaient moyennement engagés pour toutes les conditions: condition 1 ($M=3.88$, $SD=1.16$), condition 2 ($M=4.3$, $SD=1.49$), condition 3 ($M=4.9$, $SD=1.44$) et condition 4 ($M=3.8$,

SD=0.92) sans différence significative entre celles-ci ($p < 0.11$). Il a été observé que le niveau d'attachement émotionnel est plus ou moins équivalent pour toutes les conditions: condition 1 (M=3.66, SD=1.66), condition 2 (M=3.4, SD=1.90), condition 3 (M=3.7, SD=1.83) et condition 4 (M=2.7, SD=1.42) toujours sans différence significative ($p < 0.50$). Cependant, les réponses aux questionnaires ont démontré des différences significatives ($p < 0.01$) entre chaque condition au niveau du stress ressenti par les participants. Il existe des différences importantes entre la condition 1 et la condition 3 ($p < 0.01$), la condition 1 et la condition 4 ($p < 0.01$) et entre la condition 2 et la condition 3 ($p < 0.02$). Aucune différence significative n'a été reportée entre les conditions à propos de la frustration ($p < 0.28$) et de la joie ressentie ($p < 0.58$). Il y a cependant une différence marginale au niveau de la peur ressentie entre les conditions ($p < 0.07$) et une différence significative pour le sentiment de surprise entre les conditions ($p < 0.01$), particulièrement entre la condition 1 et la condition 3 ($p < 0.02$), la condition 2 et la condition 3 ($p < 0.03$), et la condition 3 et la condition 4 ($p < 0.01$). Enfin, aucun participant n'a ressenti de dégoût dans toutes les conditions (M=1, SD=0).

Les réponses des participants au questionnaire sur l'analyse émotionnelle après chaque séance de réalité virtuelle a permis de confirmer qu'ils existent des différences entre les conditions. Ces différences confirment que notre conception des quatre séances de réalité virtuelle a permis de générer différents états psychologiques d'une condition à l'autre, particulièrement avec la condition stressante. D'abord, les participants ont signalé avoir eu peu d'intention d'abandonner l'expérience sauf lors de la 3^e condition. Ceci peut s'expliquer par la peur ou les effets de surprises générés dans celle-ci. Parmi les autres résultats intéressants à noter pour ce questionnaire, on peut remarquer que la condition 3 est bien définie comme étant celle la plus stressante par les participants, suivis de près dans les résultats par la 4^e condition. Comme indiqué dans l'étude de Naz (Naz, Kopper, McMahan, & Nadin, 2017), l'environnement peut avoir un effet sur l'état émotionnel des participants. Le laboratoire peut donc être considéré comme plus stressant par rapport à la forêt, notamment avec la présence d'une minuterie présente dans l'environnement. C'est également dans la condition stressante que la peur et la surprise ont été le plus ressenties chez les participants. La pression de performance peut

également avoir induit un stress chez les participants lors que la condition 4, un stress qui peut être différent de celui généré par la peur.

Un autre point intéressant à souligner dans l'expérience est que la plupart des participants ont mentionné avoir eu un certain degré de frustration, plus particulièrement pour les 3 dernières conditions où ils devaient effectuer une tâche motrice pour déplacer des prismes. Ceci s'explique probablement par la difficulté d'insérer les objets dans les trous, notamment avec la difficulté grandissante dans une même condition.

4.1.1.2 Questionnaire évaluant l'ensemble des conditions

Les réponses au questionnaire sur l'expérience global permettent d'obtenir de l'information supplémentaire sur les différentes interactions des participants dans l'ensemble de l'expérience, notamment sur la locomotion, la manipulation d'objets et leur niveau d'immersion. Chaque participant a répondu aux 20 questions de ce questionnaire après avoir complété toutes les conditions, pour un total de 200 réponses en tout. Les graphiques et les tableaux suivants représentent la répartition des réponses sur une échelle de 1 à 7.

Tableau 4.2 Moyennes (écarts-types) des réponses au questionnaire sur l'analyse de l'expérience #1

Questions	Réponses
Question 1 : Quel est le niveau d'effort utilisé pour accomplir les tâches demandées dans le jeu?	3.60 (0.70)
Question 2 : Dans quelle mesure avez-vous interagi avec l'environnement virtuel?	3.90 (1.00)
Question 3 : Croyez-vous avoir réalisé les tâches demandées de votre mieux?	5.50 (1.84)
Question 4 : Étiez-vous concentré au point de perdre la notion du temps?	5.50 (1.18)
Question 5 : Est-ce que vous avez trouvé les tâches à accomplir comme étant faciles?	4.10 (0.88)
Question 6 : Dans quelle mesure l'environnement virtuel a retenu votre attention?	5.40 (0.97)

Tableau 4.2 Moyennes (écarts-types) des réponses au questionnaire sur l'analyse de l'expérience #1 (suite)

Question 7 : Dans quelle mesure avez-vous aimé la qualité graphique de l'expérience?	4.70 (0.95)
Question 8 : Seriez-vous satisfait d'interagir avec cette interface dans un autre jeu?	4.40 (1.26)
Question 9 : Seriez-vous satisfait d'interagir avec cette interface pour effectuer un travail?	4.00 (1.05)
Question 10 : Étiez-vous conscient de l'environnement réel (salle de test) autour de vous?	2.10 (0.74)
Question 11 : Étiez-vous intéressé à savoir ce qui pouvait se produire autour de vous dans l'environnement réel?	1.60 (0.70)
Question 12 : À quel point êtes-vous senti immergé dans l'environnement virtuel?	5.30 (1.16)
Question 13 : À quel point vous êtes-vous senti motivé en réalisant les tâches demandées dans le jeu?	5.60 (0.70)
Question 14 : Dans quelle mesure avez-vous utilisé votre vision pour rechercher ou observer activement dans l'environnement?	5.40 (1.58)
Question 15 : À un moment donné, vous êtes-vous retrouvé tellement impliqué dans l'expérience au point d'oublier que vous utilisiez des contrôleurs pour les mains virtuelles?	4.50 (1.51)
Question 16 : À un moment donné, vous êtes-vous retrouvé tellement impliqué dans l'expérience au point d'avoir l'intention de parler au jeu directement?	2.90 (1.97)
Question 17 : Dans vos déplacements, croyez-vous avoir bien exploité l'espace de jeu permis par l'expérience?	5.20 (1.40)
Question 18 : Dans quelle mesure aviez-vous l'impression de vous déplacer dans le jeu selon votre propre volonté?	5.60 (1.07)
Question 19 : Dans quelle mesure les déplacements dans l'environnement virtuel étaient convaincants?	5.90 (0.99)
Question 20 : Dans quelle mesure pouvez-vous déplacer ou manipuler des objets dans l'environnement virtuel?	4.80 (1.48)

Les participants semblent avoir utilisé un niveau d'effort faible à modéré pour accomplir les quatre conditions ($M=3.6$, $SD=0.70$) tout en ayant moyennement interagi avec l'environnement virtuel ($M=3.9$, $SD=1.00$). Si le niveau d'effort était plus ou moins élevé, la plupart des participants croient néanmoins avoir réalisé les tâches demandées de leur mieux

(M=5.5, SD=1.84) tout en étant assez concentrées pour perdre la notion du temps (M=5.5, SD=1.18). De façon générale, ils ont trouvé les tâches comme étant moyennement difficiles (M=4.1, SD=0.88). Il n'est pas très surprenant que l'environnement virtuel ait bien retenu leur attention lors de la réalisation des tâches, particulièrement pour la première condition lorsqu'il était demandé de chercher et compter des objets dans l'environnement (M=5.4, SD=0.97). Le niveau de qualité graphique de l'expérience semble avoir été assez apprécié par les utilisateurs (M=4.7, SD=0.95). Au niveau des interactions avec les objets et l'environnement virtuel, les participants seraient moyennement satisfaits de réutiliser les mêmes interactions dans le contexte d'une autre expérience virtuelle (M=4.4, SD=1.26) et dans celui d'une expérience de travail (M=4.0, SD=1.05). Au niveau de l'immersion, les participants étaient assez immergés dans les expériences virtuelles pour ne pas être très conscients de l'environnement réel (M=2.10, SD=0.74) et pour ne pas chercher à comprendre ce qui pouvait se produire réellement autour d'eux (M=1.60, SD=0.70) résultant à un sentiment d'immersion élevée (M=5.3, SD=1.16). Ils ont également mentionné se sentir très motivés en réalisant les tâches demandées (M=5.6, SD=0.70). Sans surprise, l'utilisation du sens de la vue a été élevée pour chercher des éléments dans l'environnement (M=5.4, SD=1.58) particulièrement pour la première condition. Par contre, les participants ne se sont pas sentis très impliqués au point de perdre conscience qu'ils utilisaient des contrôleurs afin de manipuler des mains virtuelles (M=4.5, SD=1.51) et encore moins pour avoir l'intention de parler au jeu pour différentes raisons (M=2.9, SD=1.97). En niveau des déplacements, les participants croient avoir bien exploité l'espace du jeu permis (M=5.2, SD=1.40), de s'être déplacé selon leur propre volonté (M=5.6, SD=1.07), que ces déplacements étaient convaincants (M=5.9, SD=0.99) et qu'ils étaient capables de déplacer des objets dans l'environnement virtuel (M=4.8, SD=1.48).

4.1.1.3 Questionnaire évaluant le niveau de présence

Les réponses au questionnaire sur l'état de présence permettent de mesurer de façon subjective le niveau de présence qu'un utilisateur a pu atteindre lors de l'expérience de réalité virtuelle. Chaque participant a répondu aux 24 questions de ce questionnaire après avoir

complété toutes les conditions, pour un total de 240 réponses en tout. Les graphiques suivants représentent la répartition des réponses sur une échelle de 1 à 7.

Le questionnaire de Witmer & Singer comporte plusieurs sous-échelles représentant différentes composantes pouvant influencer et mesurer l'effet de présence. Le Tableau 4.3 présente les moyennes et les écarts-types des réponses aux questions utilisées pour évaluer l'effet de présence à travers toutes les conditions, distribués entre les 7 sous-échelles de l'effet de présence.

Tableau 4.3 Évaluation de l'effet de présence

Sous-échelle	Questions	Moyenne (écart-type) sur 7 points
Réalisme	3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 10 + 13	5.04 (0.49)
Possibilité d'agir	1 + 2 + 8 + 9	4.75 (1.00)
Qualité de l'interface	14 + 17 + 18 (cotations inversées pour ces questions)	5.93 (0.47)
Possibilité d'examiner	11 + 12 + 19	4.37 (1.11)
Auto-évaluation de la performance	15 + 16	6.20 (0.68)
Auditif	20 + 21 + 22	5.76 (0.73)
Haptique	23 + 24	3.90 (1.77)
Total	Toutes	5.11 (0.55)

Les participants ont exprimé avoir eu un bon niveau de présence dans la réalité virtuelle. Ceci indique que les événements virtuels ont eu un pouvoir d'influence élevé sur leurs réactions et leurs états psychologiques. Plus le niveau de présence est élevé, plus le lien émotionnel avec une expérience sera élevé.

4.1.1.4 Questionnaire évaluant le cybermalaise

Enfin, le questionnaire sur les cybermalaises (Kennedy *et al.*, 1993) permet de mesurer si l'expérience a procuré des symptômes pouvant avoir un impact sur leur comportement et leur état psychologique. Chaque participant a répondu aux 16 questions de ce questionnaire après avoir complété toutes les conditions, pour un total de 160 réponses en tout. Les réponses possibles varient d'une échelle de 0 (Pas du tout) à 3 (Sévèrement). Le Tableau 4.4 présente les moyennes et les écarts-types des réponses aux questions évaluant les différents symptômes perçus par les participants.

Tableau 4.4 Évaluation du cybermalaise

Symptômes	Moyenne (écart-type)
Inconfort général	0.30 (0.48)
Fatigue	0.20 (0.42)
Mal de tête	0.10 (0.32)
Fatigue des yeux	0.40 (0.70)
Difficulté à faire le focus	0.10 (0.32)
Augmentation de la salivation	0.20 (0.42)
Transpiration	0.90 (0.88)
Nausées	0.00 (0.00)
Difficulté à se concentrer	0.00 (0.00)
Impression de lourdeur dans la tête	0.40 (0.70)
Vision embrouillée	0.10 (0.32)
Étourdissement les yeux ouverts	0.10 (0.32)
Étourdissement les yeux fermés	0.00 (0.00)
Vertiges	0.00 (0.00)
Conscience de l'estomac	0.20 (0.42)
Rot	0.00 (0.00)

Un autre fait important à mentionner est que les participants ont eu peu ou pas de symptômes de cybermalaises. Ces différents symptômes peuvent influencer les données physiologiques du corps comme une augmentation de la sudation ou du rythme cardiaque lorsqu'une personne est étourdie ou lors d'effets de vertiges par exemple. Heureusement, aucun symptôme important n'a été déclaré, ce qui suggère que les données physiologiques de cette expérience n'ont pas été influencées par le cybermalaise.

4.1.2 Les résultats des mesures physiologiques

4.1.2.1 Rythme cardiaque

Au niveau des réactions physiologiques, il est pertinent de comparer le rythme cardiaque et l'activité électrodermale entre chacune des séances. La Figure 4.3 présente l'évolution du rythme cardiaque par condition pour chaque participant représenté par une couleur.

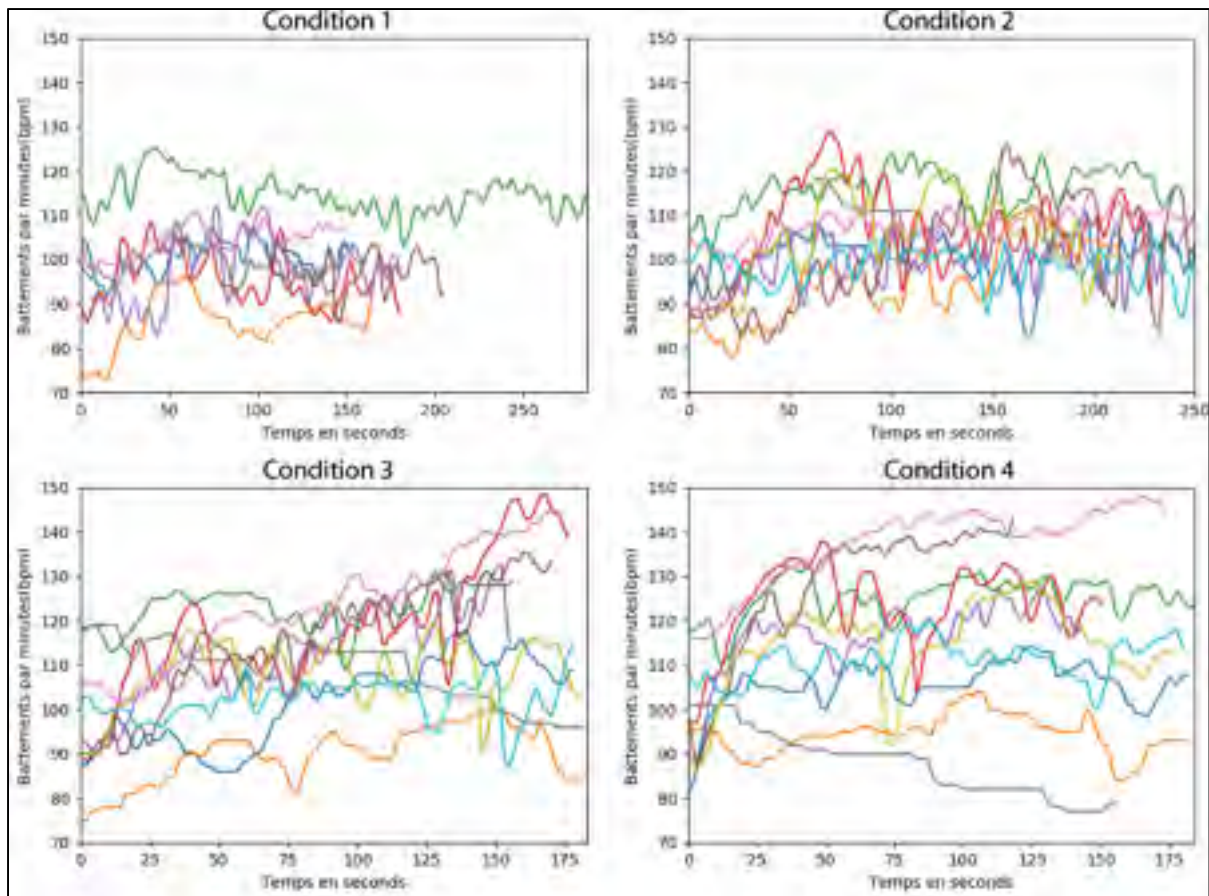


Figure 4.3 Évolution du rythme cardiaque par condition pour chaque participant

Chaque participant est représenté par une couleur unique dans les graphiques. Il est à noter que 2 participants ne sont pas représentés pour la première condition à cause d'un problème d'enregistrement des données survenu lors de la capture. Aussi, certains plateaux peuvent être observés dans les graphiques. Ceci s'explique par des problèmes d'enregistrement temporaire causé par un mauvais contact entre le capteur du rythme cardiaque et la peau du participant. Dans ces cas-ci, le capteur a plutôt réenregistré la dernière valeur obtenue jusqu'à l'obtention d'une nouvelle mesure. De plus, la durée des conditions a varié d'un participant à l'autre selon leur performance. On peut remarquer ici qu'il y a de différences dans la durée entre les participants. Par exemple, un participant a presque utilisé deux fois plus de temps que les autres pour la première condition. On peut également remarquer que les conditions 3 et 4 affichent les rythmes cardiaques les plus élevés.

Afin de simplifier la comparaison du rythme cardiaque, la moyenne de tous les participants pour chaque condition a été calculée. La Figure 4.4 présente la comparaison du rythme cardiaque moyen entre chaque séance de réalité virtuelle ainsi que la différence d'une condition à l'autre.

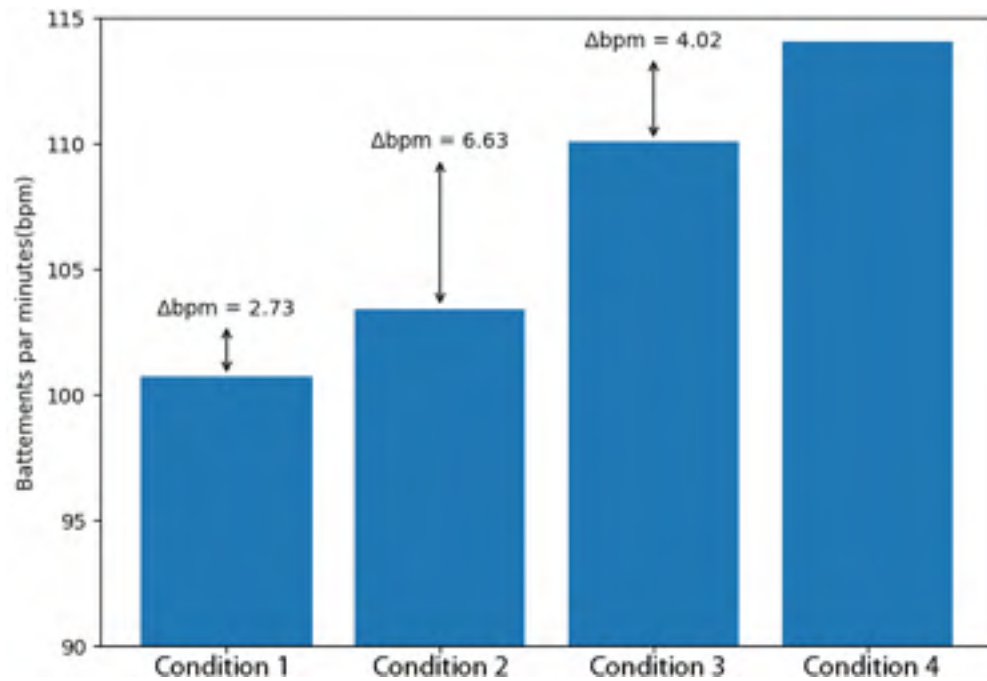


Figure 4.4 Comparaison du rythme cardiaque moyen entre les conditions

La première condition présente un rythme cardiaque moyen pour tous les participants de 100.70 battements par minutes (bpm). La deuxième condition présente une moyenne de 103.43 battements par minutes, la troisième condition à 110.06 battements par minutes et enfin la quatrième condition à 114.08 battements par minutes. La variation du rythme cardiaque moyen entre les conditions est de 2.73 battements par minutes entre la première et la deuxième condition, 6.63 battements par minutes entre la deuxième et la troisième condition et enfin 4.02 battements par minutes entre la troisième et la dernière condition.

On remarque qu'il y a des différences importantes d'une condition à l'autre au niveau du rythme cardiaque, et ce, malgré le repos nécessaire entre chacune d'entre elles pour remplir un questionnaire. La première condition correspond au rythme cardiaque le plus faible étant donné

l'absence d'élément stressant et le peu d'effort physique nécessaire pour compléter la tâche. Le rythme moyen est légèrement plus élevé pour la deuxième condition. Celle-ci ne possède toujours pas d'élément stressant et correspond exactement au même environnement que la première condition. Ce qui explique probablement cette différence au niveau du rythme cardiaque serait l'effort physique nécessaire à accomplir pour effectuer plusieurs déplacements afin de récupérer les prismes et de les insérer dans les trous. Il y a une différence importante entre la deuxième condition et la troisième condition. Cette fois-ci, la tâche et la difficulté entre ces deux conditions ne changent pas, mais l'ajout d'élément stressant et d'effets de surprise peut contribuer à cette augmentation du rythme cardiaque moyen. Enfin, il y a également une différence entre la troisième et la quatrième condition. Cette dernière condition ne contient pas d'élément stressant, mais se produit dans le même environnement. Cependant, il a été demandé au participant d'effectuer la tâche le plus rapidement possible. Cette différence pourrait s'expliquer par l'effort physique supplémentaire à accomplir.

La troisième condition nécessite plus d'attention puisque la tâche demandée n'est pas constante, car des éléments stressants et des surprises apparaissent de façon graduelle au cours de l'expérience. Pour mieux analyser l'évolution du rythme cardiaque, cette condition a été divisée en 3 parties: situation non stressante (1), début progressif des éléments stressants (2) et explosion et destructions de l'environnement pour un maximum d'éléments stressants (3). La première partie ne contient aucun élément stressant omis le fait qu'un compte à rebours soit présent dans l'environnement. Elle correspond à la première minute de la tâche. La deuxième partie inclut tous les éléments stressant jusqu'à l'explosion et la destruction de l'environnement. Cette partie englobe la 60e seconde jusqu'à la 125e seconde, soit le moment où l'explosion survient. La troisième partie de cette tâche correspond à la situation où de la fumée, des flammes et des objets s'envolent pour déstabiliser le participant. La Figure 4.5 présente l'évolution du rythme cardiaque de la 3e condition divisée en 3 parties, où chaque participant est représenté par une couleur.

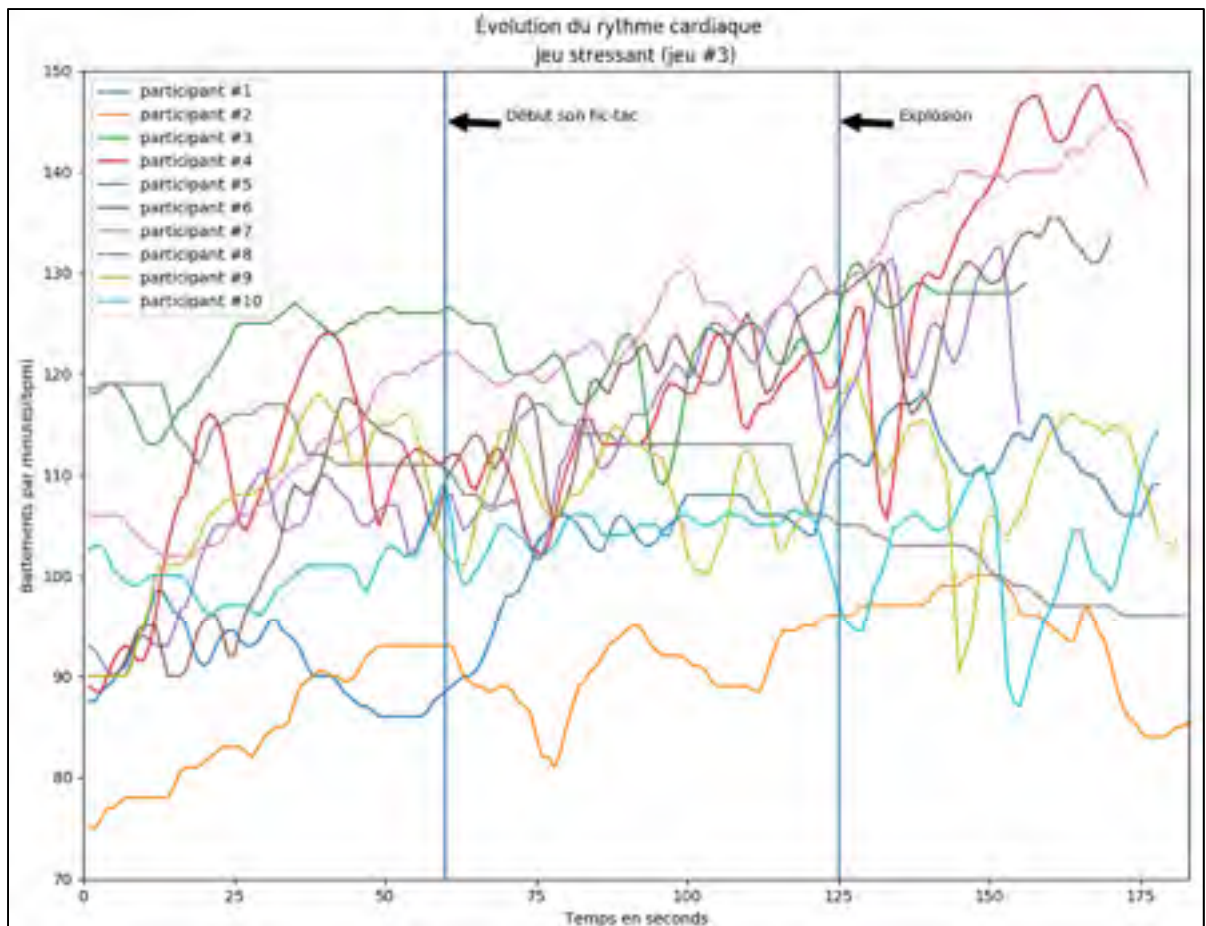


Figure 4.5 Évolution du rythme cardiaque lors de la 3e condition

On remarque que certains participants ont réagi aux différents stimulus stressants avec l'augmentation du rythme cardiaque à partir de la 2e partie et dans la 3e partie de l'expérience. Cependant, certains participants semblent avoir réagi plus que d'autres. Il est donc intéressant de comparer les moyennes du rythme cardiaque pour les trois parties de cette condition. La Figure 4.6 présente la comparaison de ces moyennes.

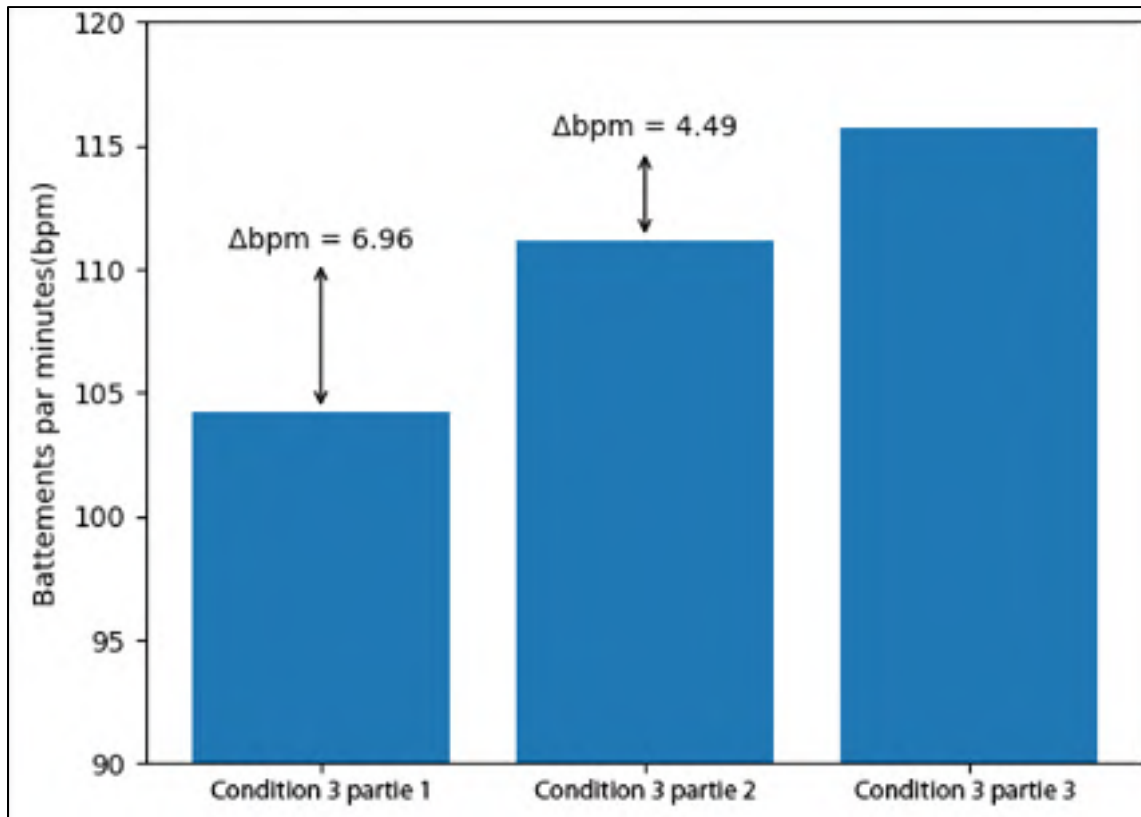


Figure 4.6 Comparaison du rythme cardiaque moyen entre les 3 parties de la condition 3

Encore une fois, il est intéressant d'observer des différences importantes entre les 3 parties de cette condition. On a respectivement des rythmes cardiaques moyens à 104.22, 111.18 et 115.76 battements par minutes pour la partie 1, 2 et 3. On observe ainsi une plus grande différence du rythme cardiaque entre la première partie et la deuxième partie en comparaison avec la différence de la deuxième partie avec la troisième partie.

4.1.2.2 Activité électrodermale

La même analyse effectuée à propos de l'évolution du rythme cardiaque a été appliquée à l'analyse de l'activité électrodermale. La Figure 4.7 présente l'évolution de la conductance cutanée pour chaque condition, où tous les participants sont représentés par une couleur unique.

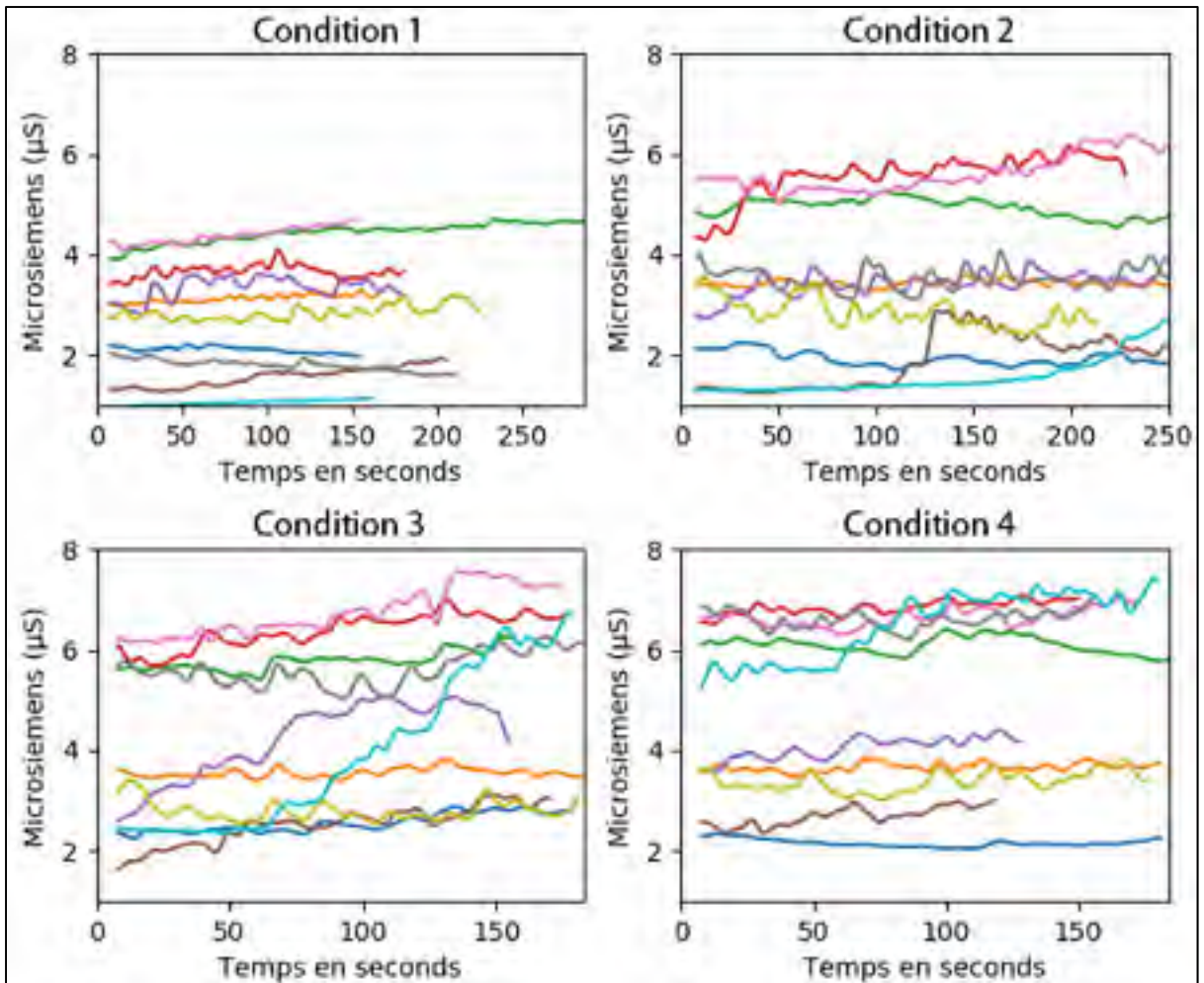


Figure 4.7 Évolution de la conductance cutanée par condition pour chaque participant

Tout comme le rythme cardiaque, il est possible de remarquer une grande différence entre les participants, avec une conductance cutanée plus élevée pour la troisième et la quatrième condition. Aussi, en comparant l'ensemble des graphiques, on s'aperçoit qu'il semble exister une certaine stabilité dans les mesures de la première condition comparativement aux autres conditions.

Toujours dans le but de simplifier la comparaison entre les conditions, la moyenne en microsiemens de la conductance cutanée pour chaque condition a été calculée. La Figure 4.8 présente la comparaison de cette conductivité moyenne entre chaque séance de réalité virtuelle ainsi que la différence d'une séance à l'autre.

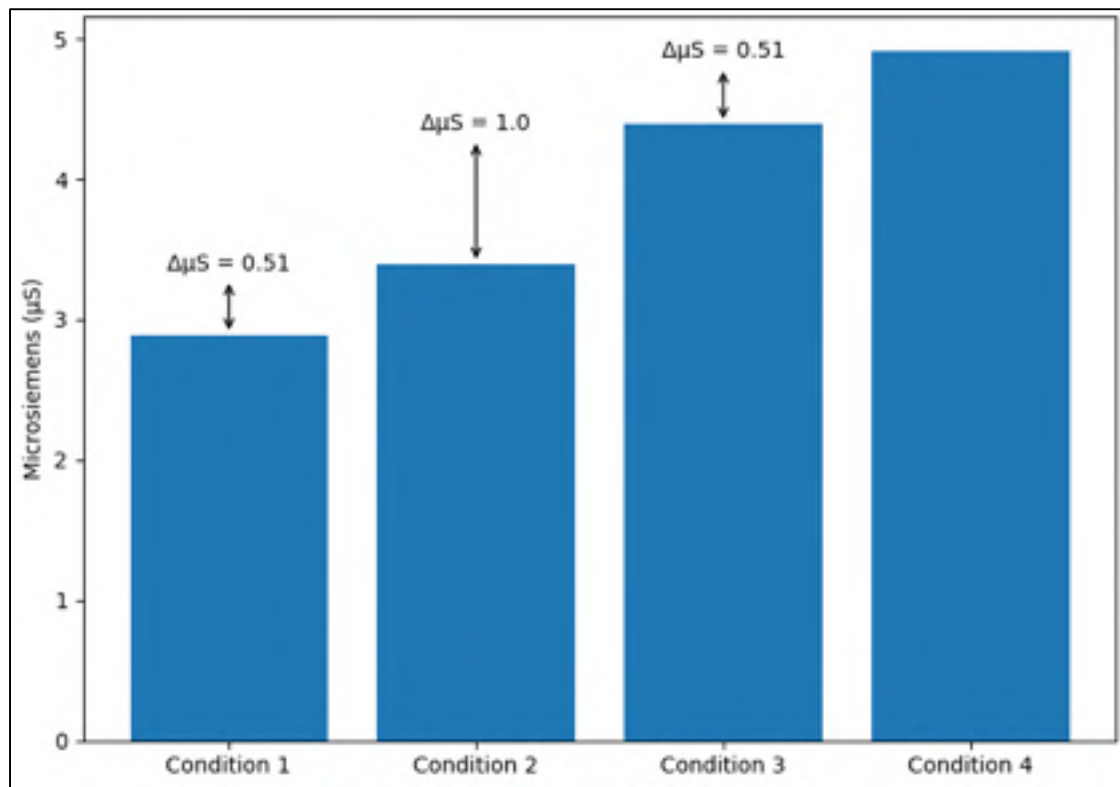


Figure 4.8 Comparaison de la conductance cutanée moyenne entre les conditions

La première condition présente une activité électrodermale de 2.89 microsiemens (μS). La deuxième condition présente une moyenne à 3.40 microsiemens, la troisième condition à 4.40 microsiemens et enfin la quatrième condition à 4.91 microsiemens. La variation de la conductance cutanée moyenne entre ces conditions est de 0.51 microsiemens entre la première et la deuxième condition, 1.00 microsiemens entre la deuxième et la troisième condition et enfin 0.51 microsiemens entre la troisième et la dernière condition. La Figure 4.9 présente l'évolution de la conductance cutanée lors de la 3e condition, divisée en 3 parties, où chaque participant est représenté par une couleur unique.

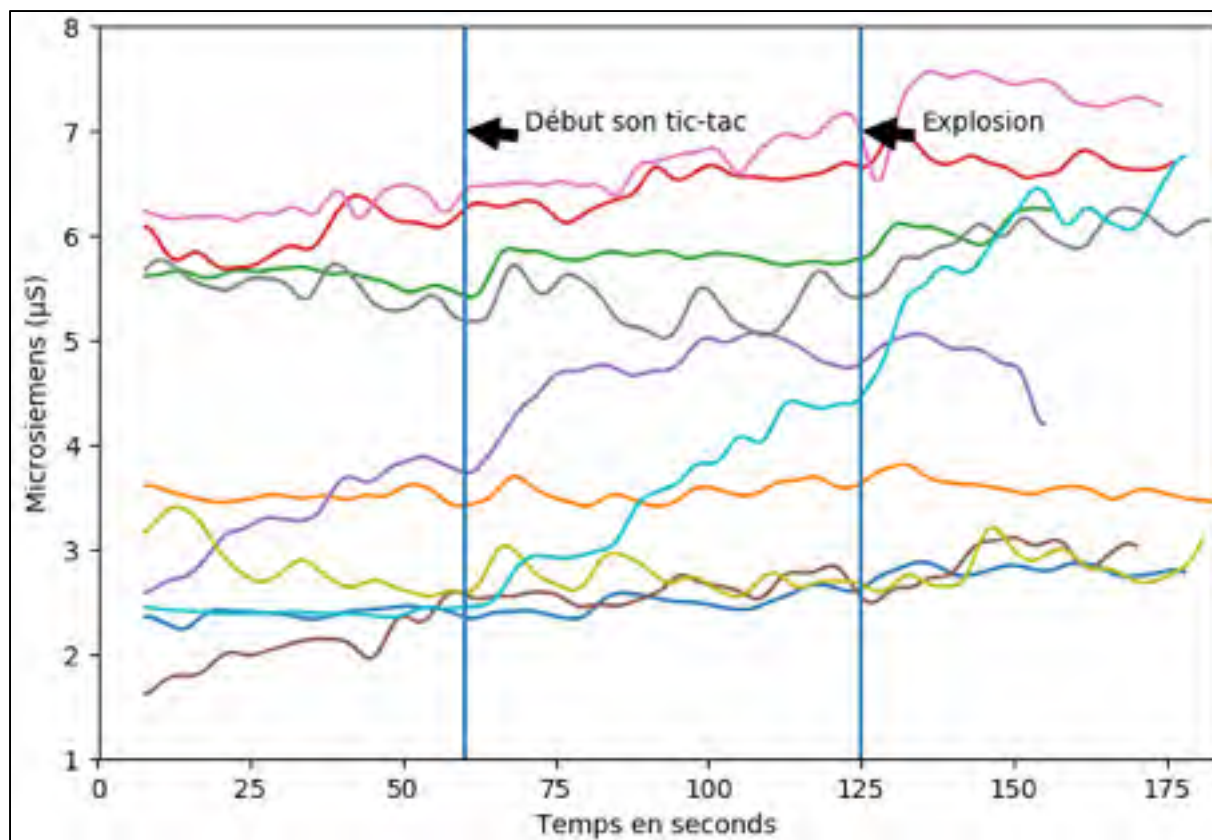


Figure 4.9 Évolution de la conductance cutanée pour lors de la 3^e condition

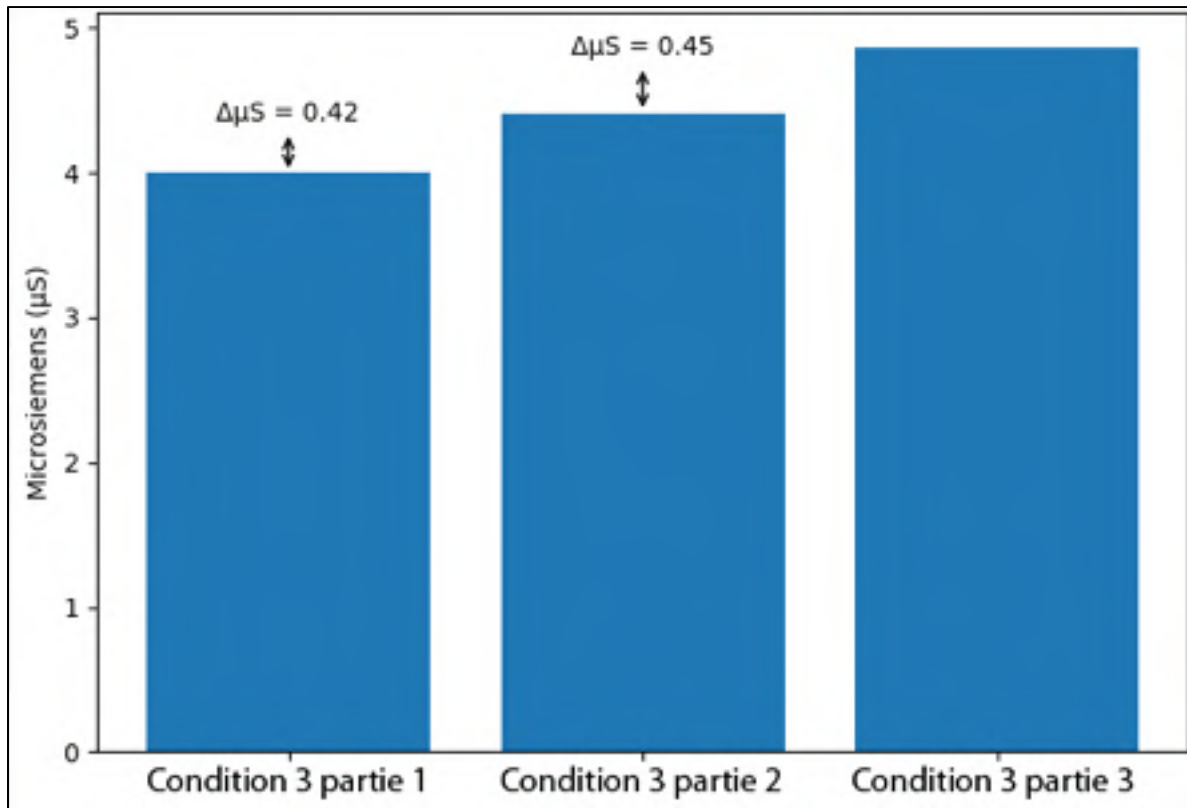


Figure 4.10 Comparaison de la conductance cutanée moyenne entre les 3 parties de la condition 3

Les deux graphiques précédents permettent d'observer une évolution moyenne positive de l'activité électrodermale durant la troisième condition. Pour les parties de cette condition, on a respectivement des mesures de conductance cutanée moyennes à 3.99, 4.41 et 4.86 microsiemens. Contrairement au rythme cardiaque, on observe ici une différence similaire entre les différentes parties de la condition, avec une différence légèrement plus grande entre la deuxième et la troisième partie.

Les résultats supportent le fait qu'il soit possible de différencier une situation stressante d'une situation plus calme à partir des données physiologiques et des différentes informations fournies par les capteurs d'un système de réalité virtuelle. Certains algorithmes de classification peuvent atteindre près de 90% de performance pour catégoriser un échantillon de données entre les 4 conditions testées. Les résultats démontrent également que la

performance des algorithmes de classification augmente si l'on analyse seulement les données d'un seul participant.

À travers les différentes séances de réalité virtuelle, il est important de noter qu'il existe des différences notables entre les participants au niveau des données physiologiques. Dès le début de la première condition, il est possible de remarquer de grandes différences tant au niveau du rythme cardiaque que de la sudation de la peau. Bien sûr, ceci s'explique par les différences physiologiques des participants, leur âge et leur santé physique en général. On peut également remarquer que cette variabilité entre les participants est plus grande que la variabilité d'un même participant à travers toutes les séances de réalité virtuelle pour les deux mesures physiologiques. Ceci est intéressant puisqu'il serait ainsi possible d'effectuer l'identification d'un participant avec ce type de différences.

Les données physiologiques présentent également des différences significatives entre les conditions. On remarque que le rythme cardiaque et l'activité électrodermale augmentent de façon progressive entre la première condition jusqu'à la dernière condition.

La troisième condition (stressant) est une tâche particulière puisqu'elle a été conçue pour ajouter de plus en plus d'éléments stressant dans le temps. Il est donc pertinent d'analyser la variation des signaux physiologiques des participants pour cette portion de l'expérience. Tel que présenté dans les résultats, cette condition est divisée en 3 parties pour faciliter l'analyse: situation non stressante (1), début progressif des éléments stressants (2) et un maximum d'éléments stressants (3). On remarque une différence significative pour le rythme cardiaque entre la première et la deuxième partie. Deux raisons peuvent expliquer ce changement: l'augmentation de l'activité physique des participants et l'ajout d'éléments stressants. Il est normal d'observer une augmentation du rythme cardiaque étant donné que le sujet a eu droit à une séance de repos afin de remplir un court questionnaire avant cette tâche. Ainsi, lorsque le participant recommence à se déplacer dans l'environnement virtuel, son activité physique augmente résultat à une augmentation du rythme cardiaque. Cependant, cela ne peut pas être la seule explication possible puisqu'on observe une différence dans le rythme cardiaque entre

la deuxième condition plus calme sans élément stressant, alors que le niveau d'effort physique demandé est le même. L'ajout des éléments stressant comme un son d'alarme constant et des lumières clignotantes influence donc le niveau de stress des participants et contribue également à augmenter leur rythme cardiaque. L'effet est similaire pour la variation de l'activité électrodermale, où le stress crée une plus forte sudation, augmentation ainsi la conductance cutanée.

4.1.3 Classification des données par condition

L'ensemble des données physiologiques et comportementales ont permis d'entraîner et de tester les 10 algorithmes de classifications pour différentes durées des échantillons. La Figure 4.11 présente la variation de la précision des algorithmes de classifications, en fonction de l'intervalle de temps sur laquelle une moyenne des données est calculé, en incluant toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques).

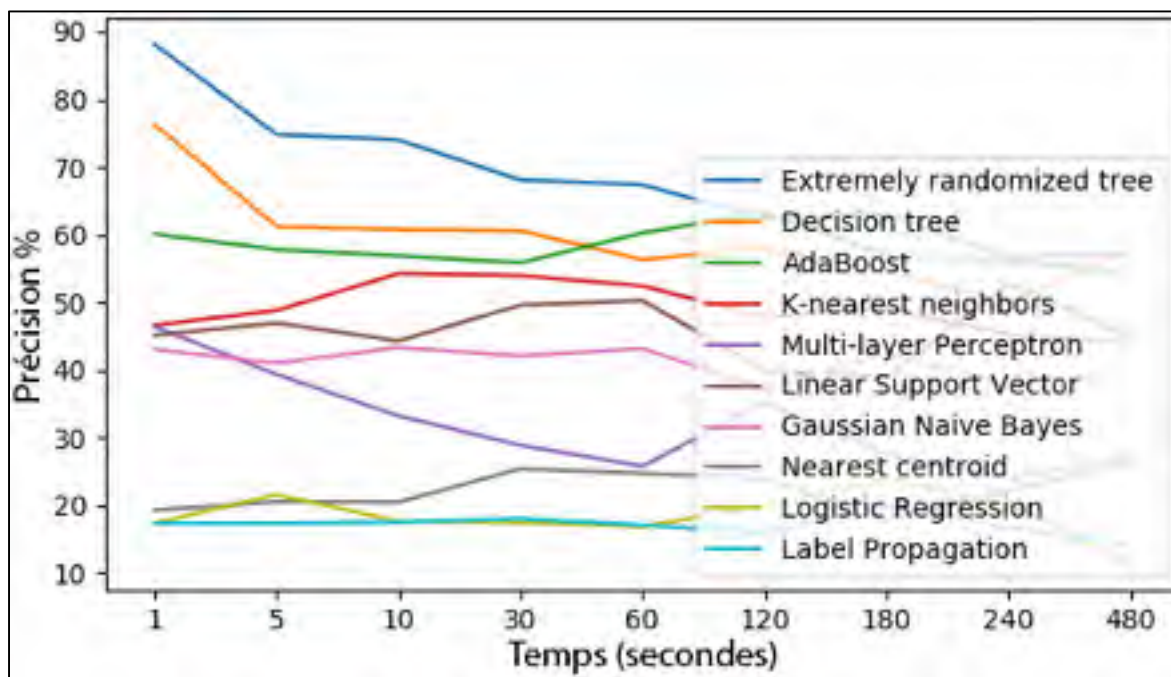


Figure 4.11 Précision des algorithmes de classifications en incluant toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques)

Ce graphique présente la performance des classificateurs à classer l'ensemble des données de mouvements et physiologiques des participants entre les différentes conditions. On peut remarquer que les deux algorithmes utilisant des arbres de décisions sont de façon générale les plus performants. L'arbre de décision extrêmement aléatoire semble être le plus performant excepté pour l'intervalle de temps inférieur à 120 secondes. On remarque également que la performance tend à diminuer lorsque la durée des échantillons testés augmente.

Puisque les données physiologiques sont des mesures contribuant fortement à la bonne classification, il est intéressant de vérifier le niveau de performance des classificateurs sans les données physiologiques.

La Figure 4.12 présente la variation de la précision des algorithmes de classifications, en fonction de l'intervalle de temps sur laquelle une moyenne des données est calculée, pour tous les participants en incluant les données de mouvements seulement.

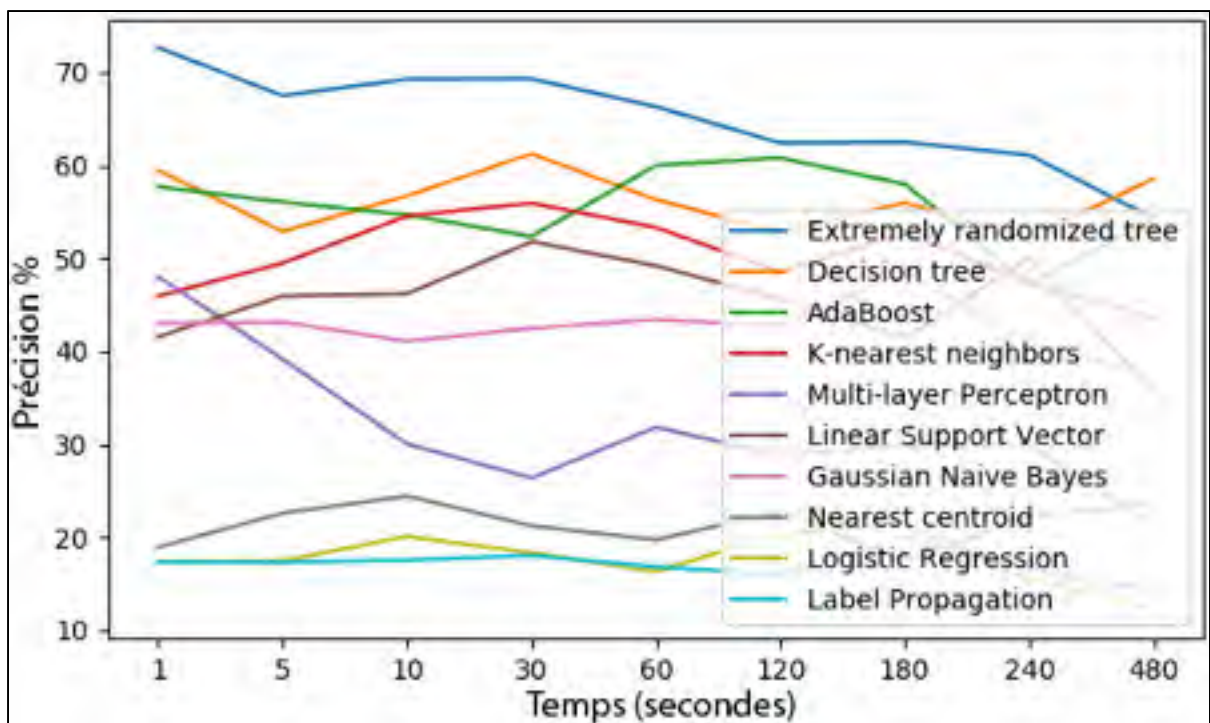


Figure 4.12 Précision des algorithmes de classifications en incluant les données de mouvements seulement

Sans les données physiologiques, le niveau de performance maximal moyen se trouve en dessous de 75% pour tous les algorithmes de classifications. De plus, on remarque que la performance varie peu selon l'intervalle de temps.

La Figure 4.13 présente la variation de la précision des algorithmes de classifications, en fonction de l'intervalle de temps sur laquelle une moyenne des données est calculée, pour tous les participants en incluant seulement les données de mouvements du haut du corps (tête + mains).

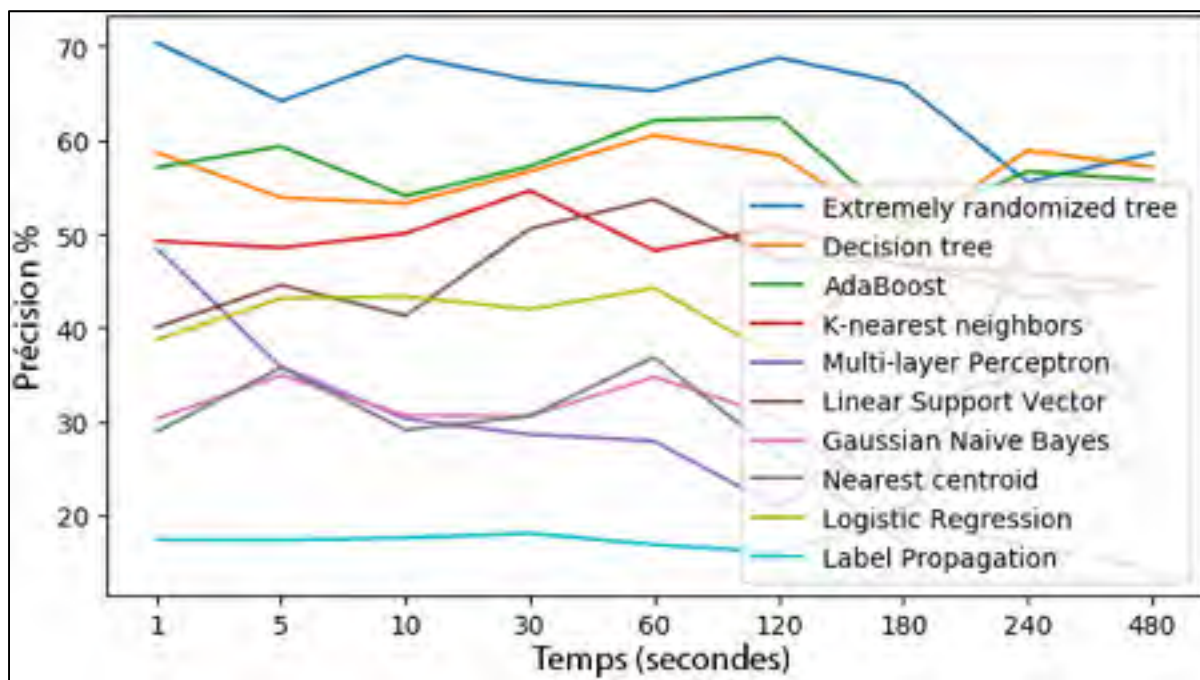


Figure 4.13 Précision des algorithmes de classifications en incluant seulement les données de mouvements du haut du corps (tête + mains)

Enfin, en analysant les performances des algorithmes de classifications en utilisant seulement le haut du corps, on remarque que leurs performances ne changent pas ou très peu comparativement aux résultats exploitant l'ensemble du corps. Ces performances sont aussi relativement stables en fonction de la durée des échantillons.

4.1.4 Importances des caractéristiques dans la classification

À partir de ces résultats, il est intéressant de vérifier quelles sont les données qui ont contribué le plus à classer les informations. La Figure 4.14 présente l'importance des 20 caractéristiques les plus influentes avec la variabilité inter arbre pour une forêt de 100 arbres de décisions aléatoires entraînée avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée. Les arbres de décisions ont été entraînés et testés avec les données provenant de l'ensemble des participants, incluant les données de mouvements et physiologiques.

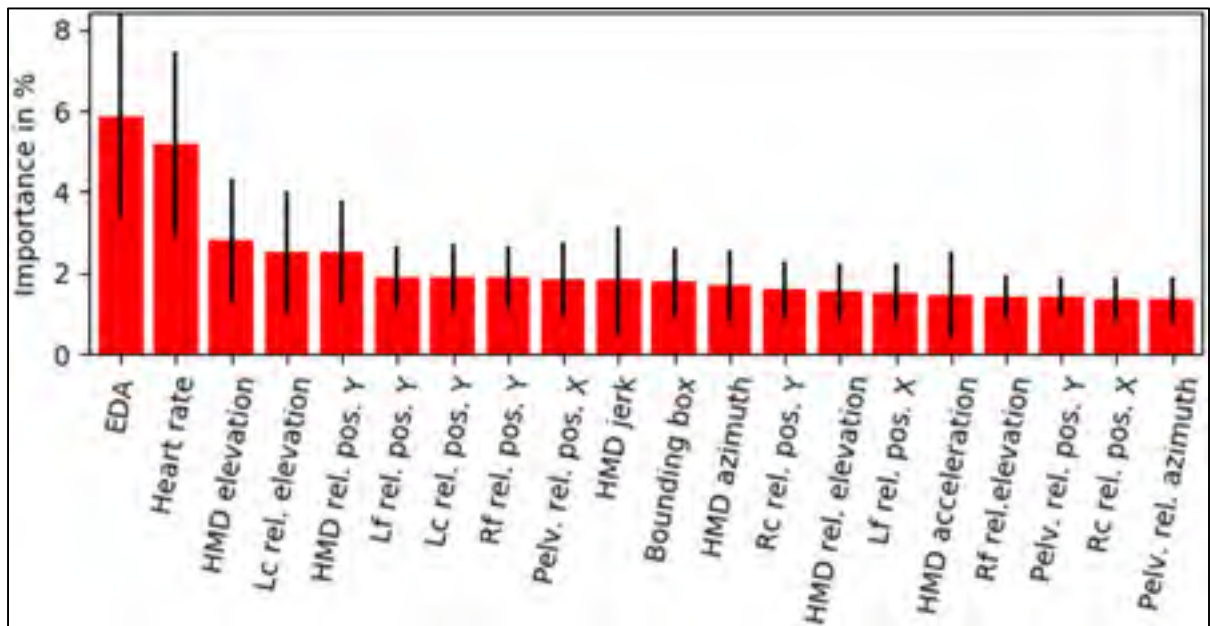


Figure 4.14 Importance des 20 caractéristiques les plus influentes en incluant toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques)

Dans ce graphique, il est possible de remarquer que les caractéristiques physiologiques, en particulier l'activité électrodermale (EDA), sont les caractéristiques les plus informatives, suivies des caractéristiques de niveau inférieur (position, vitesse et orientation). Cela suggère qu'il ne vaut peut-être pas la peine de calculer des caractéristiques de mouvement d'ordre supérieur telles que l'accélération, la secousse et la courbure, car celles-ci produisent des rendements décroissants.

La Figure 4.15 présente l'importance des 20 caractéristiques les plus influentes avec la variabilité inter arbre pour une forêt de 100 arbres de décisions aléatoires entraînée avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée. Les arbres de décisions ont été entraînés et testés avec les données provenant de l'ensemble des participants, incluant seulement les données de mouvements.

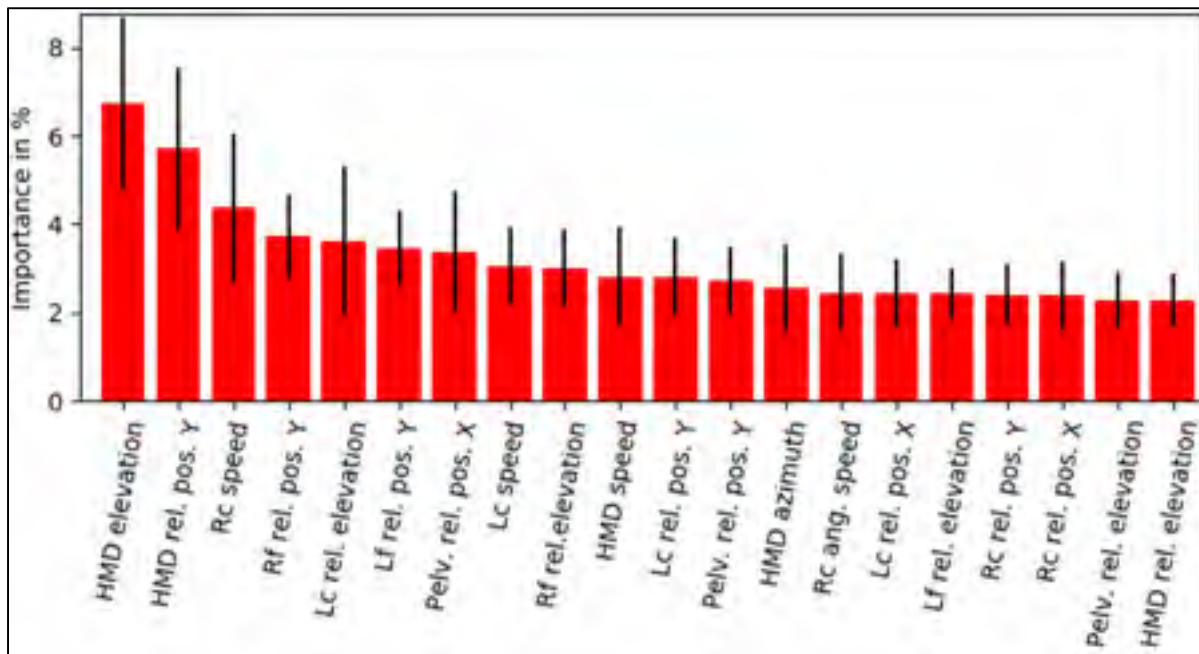


Figure 4.15 Importance des 20 caractéristiques les plus influentes incluant seulement les données de mouvements

Dans ce graphique, des niveaux d'importances similaires avec une variabilité inter arbre peuvent être observés, sans les données physiologiques, dans un ordre légèrement différent. Encore une fois, il est possible de remarquer que la plupart des caractéristiques importantes sont les caractéristiques de niveau inférieur (position, vitesse et orientation).

Il était donc important de vérifier à quel point une forêt d'arbres de décisions aléatoires peut être performante en utilisant seulement les caractéristiques plus simples (position, vitesse et orientation). Un autre test a donc été effectué en excluant toutes les caractéristiques indirectes (accélération, jerk, courbure, énergie cinétique, boîte englobante) en utilisant l'algorithme de

l'arbre de décision aléatoire avec un intervalle de temps à 1 seconde. L'algorithme a atteint les performances suivantes: 89% pour toutes les données (mouvement et physiologique) avec tous les utilisateurs regroupés et 73% pour les données de mouvement uniquement. Cela montre que seules les caractéristiques de mouvement les plus élémentaires offrent le même degré de précision, ce qui permet aux futurs concepteurs d'économiser de la mémoire et du temps de traitement. Cette étude démontre donc l'utilité des données physiologiques et des caractéristiques de niveau inférieur pour distinguer les conditions avec un court intervalle de temps ($T = 1$), suggérant qu'elles pourraient être utiles dans des scénarios futurs similaires.

4.1.5 Matrices de confusion et qualité de la classification

La matrice de confusion est un tableau qui permet de visualiser la performance d'un algorithme de classification. Chaque rangée de la matrice représente les prédictions réalisées pour chaque classe alors que les colonnes représentent chaque classe réelle, c'est-à-dire les classes que l'algorithme devrait prédire. Ainsi, les éléments diagonaux représentent le score pour lequel l'algorithme a prédit avec succès une classe tandis que les autres éléments à l'extérieur de la diagonale représentent les erreurs effectuées par le classificateur. Plus les valeurs sur les diagonales sont élevées, plus la prédiction de l'algorithme est meilleure.

La Figure 4.16 présente 3 matrices de confusion normalisée résultant de la classification d'une forêt ayant 100 arbres de décisions aléatoires entraînés pour chaque condition (1, 2, 3, 4) avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée, où a) inclus toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques), b) inclus seulement les données de mouvements, c) inclus seulement les données de mouvement pour le haut du corps (tête + mains)

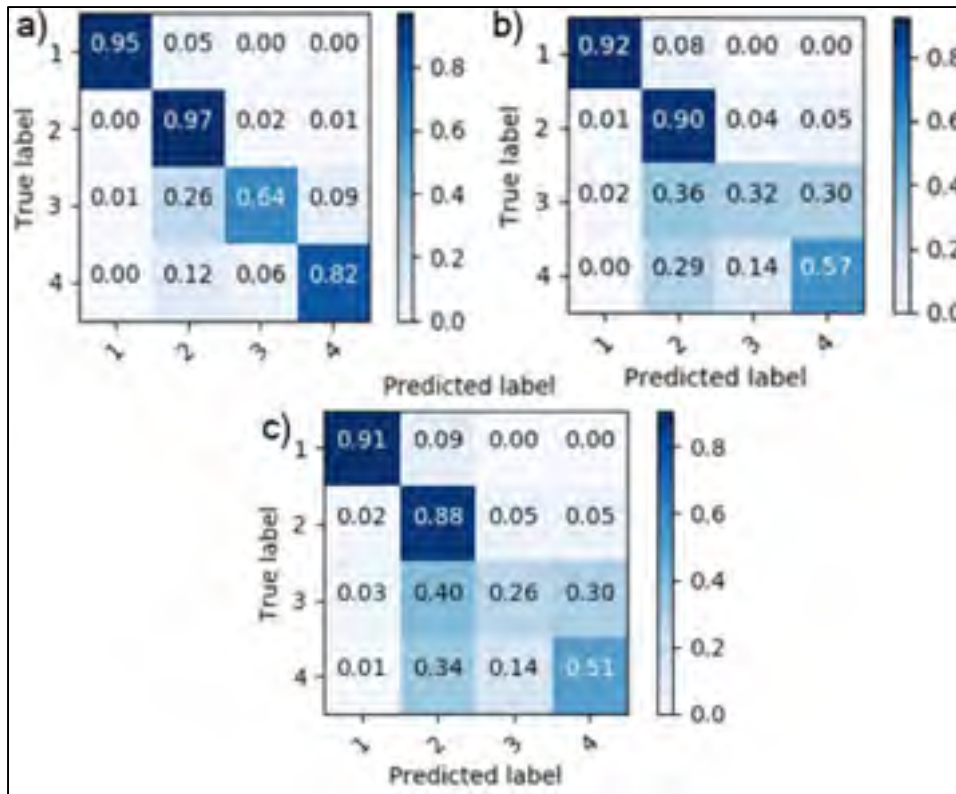


Figure 4.16 Matrices de confusion normalisées

Sur la Figure 4.16, on peut remarquer que les matrices affichent des performances élevées (>90%) pour la classification de la première condition, et ce pour toutes les évaluations testées. La performance diminue légèrement pour la condition deux avec des performances au-delà de 88%. On peut aussi remarquer que la condition 3 est plus difficile à classifier avec des performances variant de 26% à 68% de classification alors que la quatrième condition obtient des résultats variants entre 51% et 96%. À noter que ces résultats peuvent varier légèrement d'un test à l'autre selon les données sélectionnées de façons aléatoires pour l'entraînement des algorithmes.

À partir des informations fournies par la matrice de confusion, il est possible de calculer plusieurs métriques donnant de l'information supplémentaire à propos de la performance de classification des algorithmes. Les métriques analysées sont: l'exactitude (« accuracy »), la sensibilité (« recall »), la précision ainsi que le score F1. En statistique, la sensibilité d'un test,

aussi nommé ratio de vrai positif ou rappel, mesure la capacité à donner un résultat positif lorsqu'une hypothèse est vérifiée, c'est-à-dire sa capacité de vérifier avec le moins de faux négatifs. La précision mesure la proportion de résultats positifs réels parmi tous les résultats positifs obtenus. Le score F1 est la moyenne harmonique de la précision et de la sensibilité. Ces métriques sont calculées à l'aide des formules suivantes:

$$\textit{Exactitude} = \frac{VP+VN}{\textit{Nombre d'échantillons}} \quad (4.1)$$

$$\textit{Sensibilité} = \frac{VP}{VP+FN} \quad (4.2)$$

$$\textit{Précision} = \frac{VP}{VP+FP} \quad (4.3)$$

$$\textit{Score F1} = 2 \cdot \frac{\textit{Précision} \cdot \textit{Sensibilité}}{\textit{Précision} + \textit{Sensibilité}} \quad (4.4)$$

Où VP représente les vrais positifs, FP représente les faux positifs, VN représente les vrais négatifs et FN représente les faux négatifs.

Le Tableau 4.5 présente le rapport de classification d'une forêt ayant 100 arbres de décisions aléatoires entraînés pour chaque condition (1, 2, 3, 4) avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée, où toutes les données disponibles ont été utilisées.

Tableau 4.5 Rapport de classification en utilisant toutes les données disponibles
(mouvements + physiologiques)

	Précision	Sensibilité	Score F1	Nombres d'échantillons
Condition 1	0.99	0.96	0.97	346
Condition 2	0.87	0.97	0.92	857
Condition 3	0.86	0.74	0.80	357
Condition 4	0.91	0.81	0.86	435
Moyenne / Total	0.90	0.89	0.89	1995

Le Tableau 4.6 présente le rapport de classification d'une forêt ayant 100 arbres de décisions aléatoires entraînés pour chaque condition (1, 2, 3, 4) avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée, où seulement les données de mouvements ont été utilisées.

Tableau 4.6 Rapport de classification où seulement les données de mouvements ont été utilisées.

	Précision	Sensibilité	Score F1	Nombres d'échantillons
Condition 1	0.92	0.91	0.91	346
Condition 2	0.72	0.92	0.81	857
Condition 3	0.55	0.30	0.39	357
Condition 4	0.63	0.53	0.58	435
Moyenne / Total	0.70	0.72	0.70	1995

Le Tableau 4.7 présente le rapport de classification d'une forêt ayant 100 arbres de décisions aléatoires entraînés pour chaque condition (1, 2, 3, 4) avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée, où seulement les données de mouvements du haut du corps (tête + mains) ont été utilisées.

Tableau 4.7 Rapport de classification où seulement les données de mouvements du haut du corps (tête + mains) ont été utilisées.

	Précision	Sensibilité	Score F1	Nombres d'échantillons
Condition 1	0.95	0.90	0.92	347
Condition 2	0.70	0.91	0.79	859
Condition 3	0.55	0.28	0.37	357
Condition 4	0.69	0.50	0.54	435
Moyenne / Total	0.69	0.70	0.68	1998

4.2 Résultats de l'expérience #2

4.2.1 Les résultats des mesures subjectives

4.2.1.1 Questionnaire SAM

Le questionnaire SAM (Self-Assessment Manikin) (Bradley et Lang, 1994) est un outil d'évaluation des émotions qui utilise une échelle de neuf graphiques, représentant des personnages de bande dessinée exprimant trois éléments émotionnels : le plaisir, l'excitation et la dominance. Le Tableau 4.8 présente les évaluations moyennes et les écarts-types pour les deux conditions de cette expérience. Les scores obtenus ont été analysés en utilisant le test de Student (t-test). Le plaisir ($p < 0.38$) et la dominance ($p < 0.51$) n'ont pas varié de façon significative à travers les deux conditions. Cependant, l'excitation ($p < 0.01$) a varié de façon significative, indiquant qu'on a réussi à induire un état émotionnel différent chez les utilisateurs entre les deux conditions.

Tableau 4.8 Moyenne (écarts-types) de l'évaluation des dimensions émotionnelles sur une échelle de 9 points.

Conditions	Plaisir	Excitation	Dominance
Condition C	7.16 (1.46)	3.86 (2.37)	5.66 (2.16)
Condition S	6.66 (2.18)	6.25 (2.67)	5.16 (2.41)

4.2.1.2 Questionnaire évaluant l'expérience dans son ensemble

Le même questionnaire utilisé pour l'expérience #1 permettant d'évaluer les différentes interactions des participants a été utilisé. Chaque participant a répondu aux 20 questions de ce questionnaire après avoir complété l'expérience, pour un total de 300 réponses en tout. Chaque réponse est notée sur une échelle de 1 à 7.

Le Tableau 4.9 présente les moyennes et écarts-types des réponses aux questionnaires sur l'analyse de l'expérience #2 dans son ensemble.

Tableau 4.9 Moyennes (écarts-types) des réponses aux questionnaires sur l'analyse de l'expérience #2

Questions	Réponses
Question 1 : Quel est le niveau d'effort utilisé pour accomplir les tâches demandées dans le jeu?	3.25 (1.28)
Question 2 : Dans quelle mesure avez-vous interagi avec l'environnement virtuel?	5.00 (1.21)
Question 3 : Croyez-vous avoir réalisé les tâches demandées de votre mieux?	6.00 (1.35)
Question 4 : Étiez-vous concentré au point de perdre la notion du temps?	4.25 (2.01)
Question 5 : Est-ce que vous avez trouvé les tâches à accomplir comme étant faciles?	5.58 (1.24)
Question 6 : Dans quelle mesure l'environnement virtuel a retenu votre attention?	6.16 (0.94)
Question 7 : Dans quelle mesure avez-vous aimé la qualité graphique de l'expérience?	6.16 (0.83)
Question 8 : Seriez-vous satisfait d'interagir avec cette interface dans un autre jeu?	6.33 (0.89)

Tableau 4.9 Moyennes (écarts-types) des réponses aux questionnaires sur l'analyse de l'expérience #2 (suite)

Question 9 : Seriez-vous satisfait d'interagir avec cette interface pour effectuer un travail?	6.00 (1.28)
Question 10 : Étiez-vous conscient de l'environnement réel (salle de test) autour de vous?	4.75 (1.86)
Question 11 : Étiez-vous intéressé à savoir ce qui pouvait se produire autour de vous dans l'environnement réel?	4.16 (2.12)
Question 12 : À quel point êtes-vous senti immergé dans l'environnement virtuel?	5.92 (0.67)
Question 13 : À quel point vous êtes-vous senti motivé en réalisant les tâches demandées dans le jeu?	5.66 (1.23)
Question 14 : Dans quelle mesure avez-vous utilisé votre vision pour rechercher ou observer activement dans l'environnement?	6.0 (1.12)
Question 15 : À un moment donné, vous êtes-vous retrouvé tellement impliqué dans l'expérience au point d'oublier que vous utilisiez des contrôleurs pour les mains virtuelles?	4.16 (2.08)
Question 16 : À un moment donné, vous êtes-vous retrouvé tellement impliqué dans l'expérience au point d'avoir l'intention de parler au jeu directement?	3.58 (1.83)
Question 17 : Dans vos déplacements, croyez-vous avoir bien exploité l'espace de jeu permis par l'expérience?	4.92 (1.73)
Question 18 : Dans quelle mesure aviez-vous l'impression de vous déplacer dans le jeu selon votre propre volonté?	5.25 (1.42)
Question 19 : Dans quelle mesure les déplacements dans l'environnement virtuel étaient convaincants?	6.00 (0.95)
Question 20 : Dans quelle mesure pouvez-vous déplacer ou manipuler des objets dans l'environnement virtuel?	5.50 (1.00)

Les participants semblent avoir utilisé un niveau d'effort faible à modéré pour accomplir les l'expérience ($M=3.25$, $SD=1.28$). Les utilisateurs croient avoir bien interagi avec l'environnement virtuel ($M=5.00$, $SD=1.21$) tout en croyant avoir fait de leur mieux pour accomplir les tâches demandées ($M=6.00$, $SD=1.35$). Il y a cependant une grande variation dans les réponses des utilisateurs en lien avec la perte de notion du temps et leur niveau de concentration. Certains utilisateurs n'ont pas eu conscience du temps écoulé alors que d'autres ne partagent pas cet avis ($M=4.25$, $SD=2.01$). De façon générale, ils ont trouvé les tâches

comme étant assez faciles ($M=5.58$, $SD=1.24$). L'environnement virtuel semble avoir fortement retenu l'attention des utilisateurs ($M=6.16$, $SD=0.94$). Cependant, le questionnaire n'indique pas si cette attention est causée par les montres dans la condition stressante. Malgré le fait que les insectes et les monstres ne soient pas très réalistes, les utilisateurs semblent avoir aimé la qualité graphique de l'expérience ($M=6.16$, $SD=0.83$). Au niveau des interactions avec les objets et l'environnement virtuel, les participants seraient très satisfaits de réutiliser les mêmes interactions dans le contexte d'une autre expérience virtuelle ($M=6.33$, $SD=0.89$) et dans celui d'une expérience de travail ($M=6.00$, $SD=1.28$). Au niveau de l'immersion, les participants semblent avoir été conscient de l'environnement réel autour d'eux ($M=4.75$, $SD=1.86$) et chercher à comprendre ce qui pouvait se produire réellement autour d'eux ($M=4.16$, $SD=2.12$). Ces réponses contrastent avec la question 12 où les utilisateurs ont répondu s'être sentis fortement immergés dans l'environnement virtuel ($M=5.92$, $SD=0.67$). Ils ont également mentionné se sentir très motivés en réalisant les tâches demandées ($M=5.66$, $SD=1.23$). Sans surprise, l'utilisation du sens de la vue a été élevée pour chercher des éléments dans l'environnement ($M=6.00$, $SD=1.12$). Par contre, les participants ne se sont pas sentis très impliqués au point de perdre conscience qu'ils utilisaient des contrôleurs afin de manipuler des mains virtuelles ($M=4.16$, $SD=2.08$) et encore moins pour avoir l'intention de parler au jeu pour différentes raisons ($M=3.58$, $SD=1.83$). Au niveau des déplacements, les participants croient avoir bien exploité l'espace du jeu permis ($M=4.92$, $SD=1.73$), s'être déplacé selon leur propre volonté ($M=5.25$, $SD=1.42$), que ces déplacements étaient convaincants ($M=6.00$, $SD=0.95$) et qu'ils étaient capables de déplacer des objets dans l'environnement virtuel ($M=5.50$, $SD=1.00$).

4.2.1.3 Questionnaire évaluant le niveau de présence

Après avoir complété toutes les conditions de l'expérience, les utilisateurs ont rempli le même questionnaire utilisé dans l'expérience #1 pour évaluer le niveau de présence dans la réalité virtuelle. La version française¹⁶ du questionnaire de présence de Witmer et Singer (Witmer et

¹⁶ Version française : http://w3.uqo.ca/cyberpsy/docs/qaires/pres/QEP_vf.pdf

Singer, 1998) a donc été utilisée. En analysant les résultats du **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, on peut observer que le niveau de présence est plus élevé que le milieu de l'échelle et similaire aux résultats obtenus par les autres utilisateurs ayant réalisé l'expérience #1. Ceci indique que notre expérience doit être capable de générer des changements émotionnels et comportementaux chez ces participants (Meehan, 2001).

Tableau 4.10 Moyennes (écarts-types) des réponses pour les 7 catégories de questions utilisées pour évaluer l'effet de présence à travers toutes les conditions.

Sous-échelle	Questions	Moyenne (écart-type) sur 7 points
Réalisme	3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 10 + 13	5.63 (0.42)
Possibilité d'agir	1 + 2 + 8 + 9	5.83 (0.58)
Qualité de l'interface	14 + 17 + 18 (cotations inversées pour ces questions)	5.97 (0.90)
Possibilité d'examiner	11 + 12 + 19	5.58 (0.71)
Auto-évaluation de la performance	15 + 16	6.33 (0.55)
Auditif	20 + 21 + 22	5.72 (0.95)
Haptique	23 + 24	3.46 (1.96)
Total	Toutes	5.59 (0.41)

4.2.1.4 Questionnaire évaluant le cybermalaise

Tout comme la première expérience, le questionnaire évaluant le cybermalaise (Kennedy *et al.*, 1993) a été utilisé pour évaluer si l'expérience a procuré des symptômes pouvant avoir un impact sur leur comportement et leur état psychologique. Aucun symptôme important n'a été déclaré, ce qui suggère que les données physiologiques de cette expérience n'ont pas été influencées par le cybermalaise.

Tableau 4.11 Moyennes (écarts-types) des réponses aux questionnaires évaluant le cybermalaise

Symptômes	Moyenne (écart-type)
Inconfort général	0.42 (0.67)
Fatigue	0.25 (0.45)
Mal de tête	0.25 (0.62)
Fatigue des yeux	0.42 (0.67)
Difficulté à faire le focus	0.25 (0.45)
Augmentation de la salivation	0.08 (0.29)
Transpiration	0.92 (0.67)
Nausées	0.00 (0.00)
Difficulté à se concentrer	0.00 (0.00)
Impression de lourdeur dans la tête	0.40 (0.70)
Vision embrouillée	0.10 (0.32)
Étourdissement les yeux ouverts	0.10 (0.32)
Étourdissement les yeux fermés	0.00 (0.00)
Vertiges	0.00 (0.00)
Conscience de l'estomac	0.20 (0.42)
Rot	0.00 (0.00)

4.2.2 Les résultats des mesures physiologiques

L'analyse des mesures physiologiques est beaucoup plus simple pour l'expérience #2, car il suffit de comparer la condition calme et la condition stressante afin d'identifier des éléments intéressants. De plus, il n'y a pas de séquence d'évènements ni d'éléments soudains qui sont générés dans cette expérience, comparativement à la condition 3 de l'expérience #1 où l'on génère des explosions afin de vérifier les variations des données physiologiques.

Le Tableau 4.12 présente les moyennes et les écarts-types pour les deux conditions de l'expérience. On peut remarquer que ces deux données physiologiques sont plus élevées lors de la condition stressante par rapport à la condition calme. Ces résultats suggèrent que les données physiologiques des utilisateurs lors d'une expérience de réalité virtuelle sont plus élevées lors des conditions stressantes et que ces données ne sont pas influencées par le temps passé dans l'univers virtuel, car l'ordre dans laquelle la condition stressante a été exécutée a varié d'un sujet à l'autre.

Tableau 4.12 Moyennes (écarts-types) du rythme cardiaque et de l'activité électrodermale pour l'expérience #2

Conditions	Rythme cardiaque (bpm)	Activité électrodermale
Condition C	96.29 (14.43)	7.94 (6.31)
Condition S	101.79 (21.05)	8.92 (6.63)

4.2.3 Classification des données par condition

Tout comme l'expérience #1, l'ensemble des données physiologiques et des caractéristiques de mouvements calculés ont été utilisées pour entraîner et tester 10 algorithmes de classifications pour différentes durées des échantillons. Les graphiques suivants présentent les différents résultats obtenus.

La Figure 4.17 présente la variation de la précision des algorithmes de classifications en fonction de l'intervalle de temps sur laquelle une moyenne des données est calculée, pour tous les participants en incluant toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques).

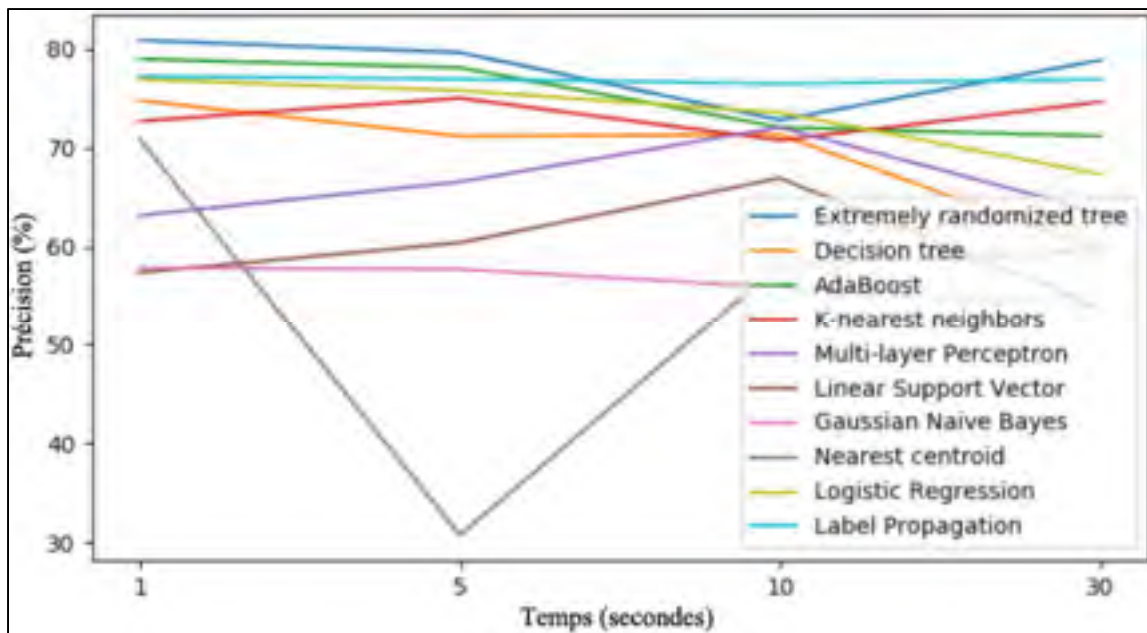


Figure 4.17 Précision des algorithmes de classifications en incluant toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques)

La Figure 4.18 présente la variation de la précision des algorithmes de classifications en fonction de l'intervalle de temps sur laquelle une moyenne des données est calculée, pour tous les participants en incluant les données de mouvements seulement.

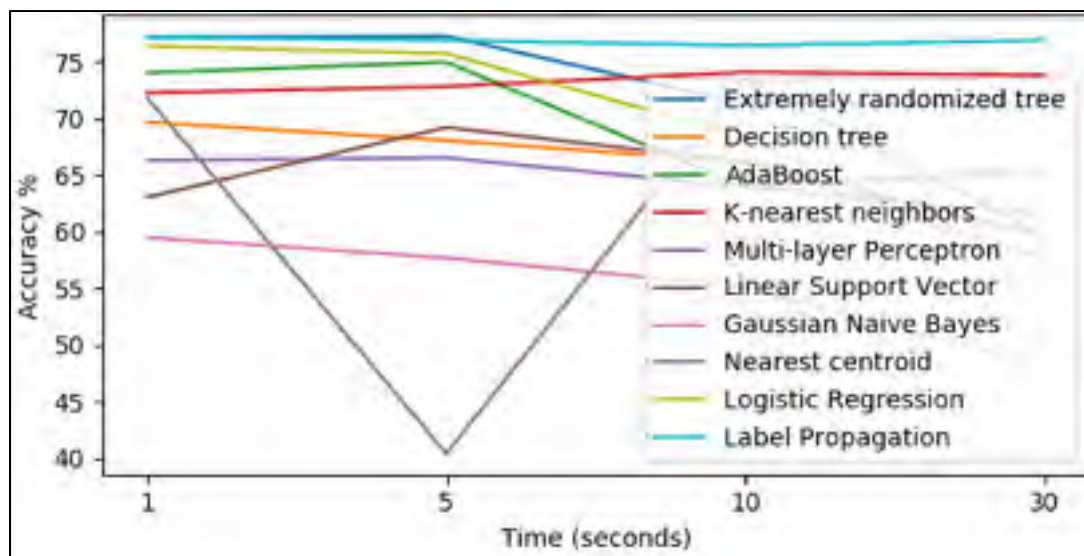


Figure 4.18 Précision des algorithmes de classifications en incluant les données de mouvements seulement

La Figure 4.19 présente la variation de la précision des algorithmes de classifications en fonction de l'intervalle de temps sur laquelle une moyenne des données est calculée, pour tous les participants en incluant seulement les données de mouvements du haut du corps (tête + mains)

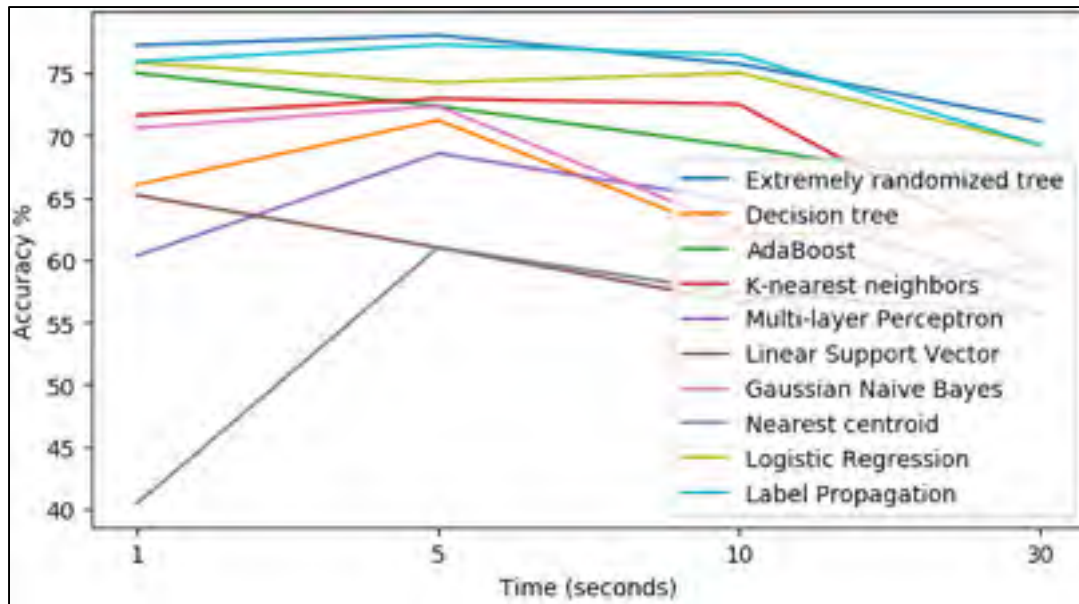


Figure 4.19 Précision des algorithmes de classifications en incluant seulement les données de mouvements du haut du corps (tête + mains)

Les trois figures précédentes présentent les performances des classificateurs à classer l'ensemble des données de mouvements et physiologiques des participants entre les deux différentes conditions. On peut remarquer que dans tous les cas, six des algorithmes testés performant au-delà de 70% comme précision de classification avec l'intervalle de temps sur laquelle une moyenne des données est calculée à chaque seconde. Cependant, en augmentant l'intervalle de temps, on ne peut pas conclure à une tendance vers l'amélioration ou le déclin de la performance des algorithmes de façon générale, par contraste aux résultats obtenus dans l'expérience #1. Certaines particularités peuvent être observées. L'algorithme « Nearest centroid » a une diminution soudaine de la performance avec un intervalle de temps à 5 seconde dans la Figure 4.17 et la Figure 4.18 incluant les données de mouvement pour le bas du corps. De plus, son comportement semble complètement différent lorsqu'on analyse seulement les données de mouvement du haut du corps (Figure 4.19) avec une augmentation de la performance avec un intervalle de temps à 5 secondes. Une hypothèse expliquant la variation des performances serait simplement que cet algorithme n'est pas adapté aux types de données ou même à la quantité de caractéristiques analyser dans le cadre de cette recherche. Les algorithmes d'apprentissage assembleur (AdaBoost, arbre de décision et arbre de décision

extrêmement aléatoire), performant bien, mais ne se distinguent pas aussi fortement en comparant les résultats de l'expérience #1. Néanmoins, l'arbre de décision extrêmement aléatoire semble toujours être l'algorithme le plus performant pour un intervalle de temps à 1 seconde.

4.2.4 Importances des caractéristiques dans la classification

Les graphiques suivants présentent l'importance des différentes caractéristiques mesurée chez les participants avec un forêt de 100 arbres de décisions extrêmement aléatoire. Pour simplifier la lecture de ces graphiques, seules les 20 caractéristiques les plus importantes ont été conservées.

La Figure 4.20 présente l'importance des 20 caractéristiques les plus influentes avec la variabilité interarbre pour une forêt de 100 arbres de décisions aléatoires entraînée avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée. Les arbres de décisions ont été entraînés et testés avec les données provenant de l'ensemble des participants, incluant les données de mouvements et physiologiques.

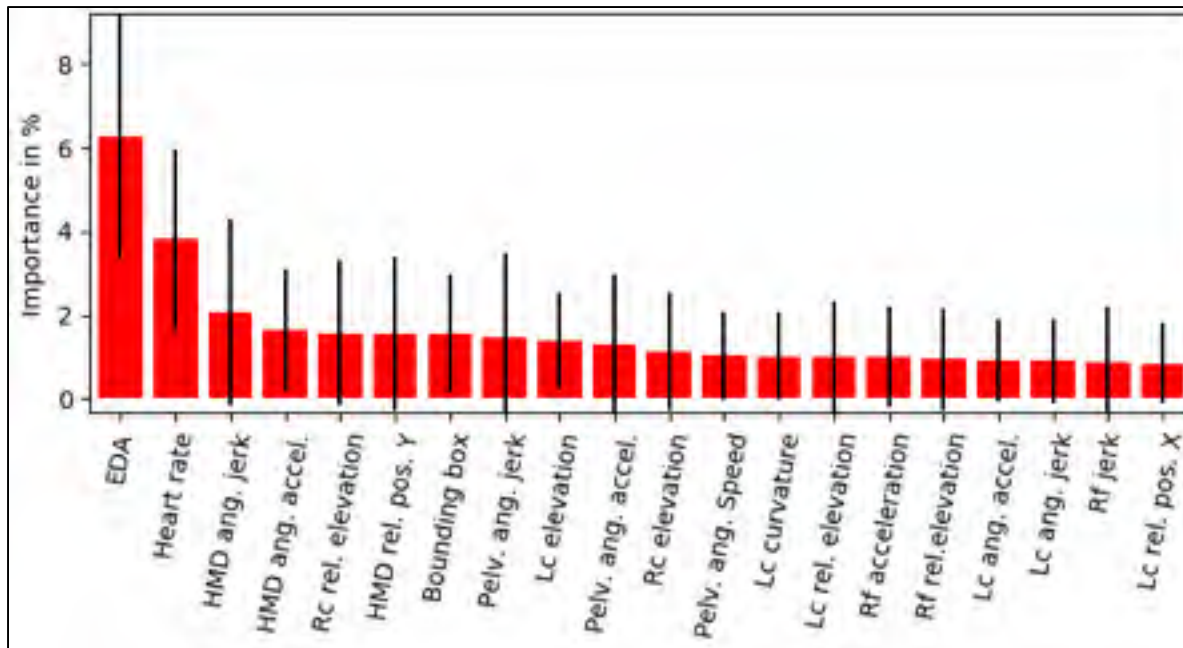


Figure 4.20 Importance des 20 caractéristiques les plus influentes toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques)

La Figure 4.21 présente l'importance des 20 caractéristiques les plus influentes avec la variabilité inter arbre pour une forêt de 100 arbres de décisions aléatoires entraînée avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée. Les arbres de décisions ont été entraînés et testés avec les données provenant de l'ensemble des participants, incluant seulement les données de mouvements.

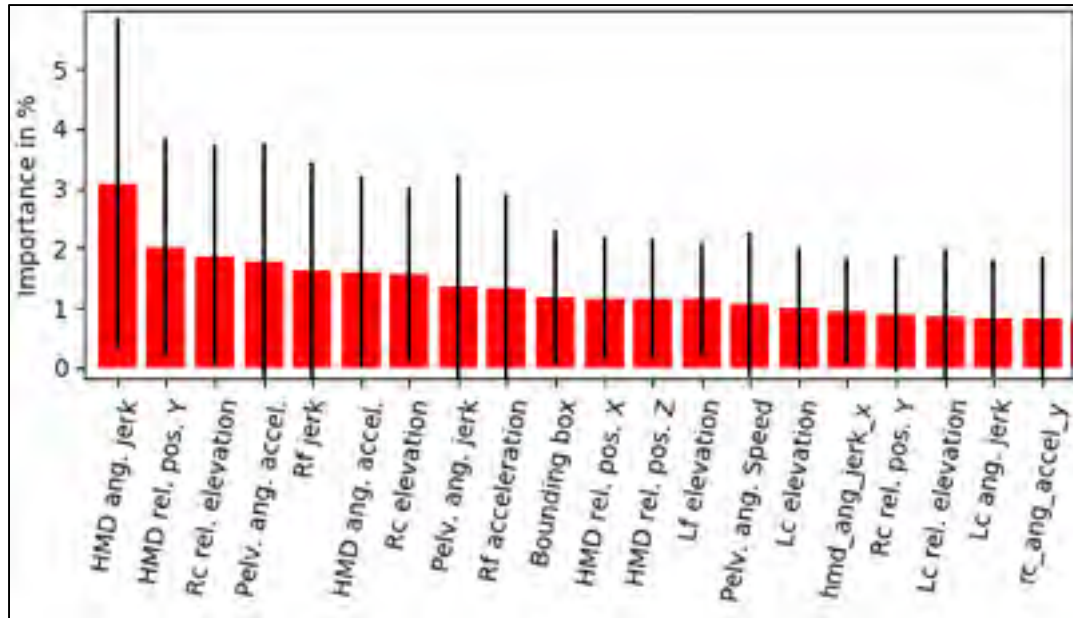


Figure 4.21 Importance des 20 caractéristiques les plus influentes incluant seulement les données de mouvements

La Figure 4.22 présente l'importance des 20 caractéristiques les plus influentes avec la variabilité inter arbre pour une forêt de 100 arbres de décisions aléatoires entraînée avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée. Les arbres de décisions ont été entraînés et testés avec les données provenant de l'ensemble des participants, incluant seulement les données de mouvements provenant du haut du corps.

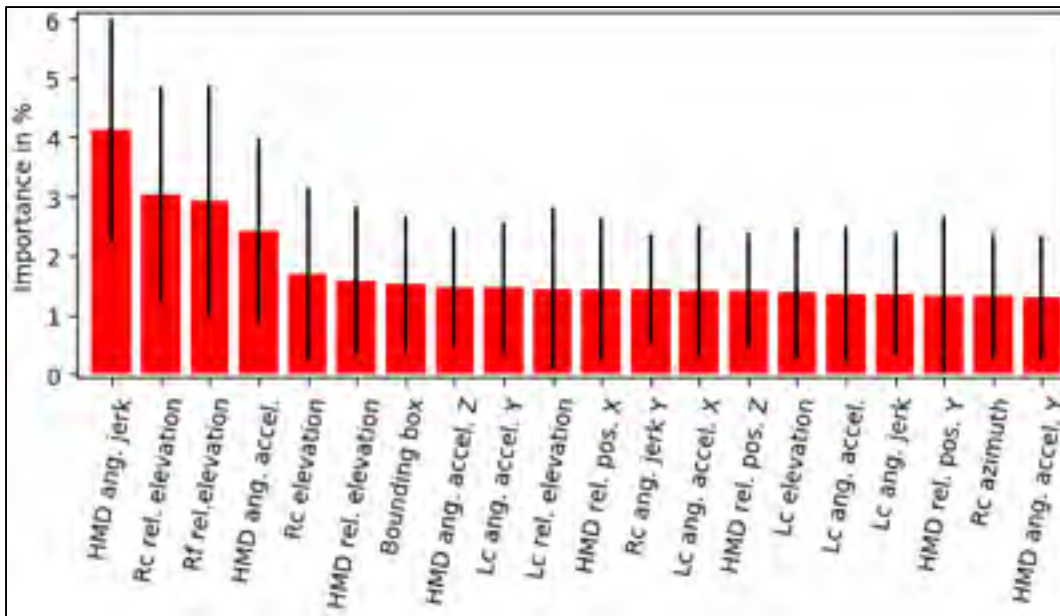


Figure 4.22 Importance des 20 caractéristiques les plus influentes incluant seulement les données de mouvements provenant du haut du corps

Dans la Figure 4.20, il est possible de remarquer que les caractéristiques physiologiques, en particulier l'activité électrodermale (EDA), sont les caractéristiques les plus informatives. Dans cette même figure, on peut également observer que 6 des 20 mesures les plus importantes sont en lien avec l'élévation des différents capteurs. On retrouve aussi plusieurs caractéristiques en lien avec l'élévation dans la Figure 4.21 (5 caractéristiques d'élévation) et la Figure 4.22 (6 caractéristiques d'élévation). Dans ces trois figures, on remarque également que la variabilité interarbre des différentes caractéristiques est très élevée par rapport à leur importance, ce qui suppose qu'il peut y avoir de grandes différences dans le poids attribué à ces caractéristiques entre chaque classification de l'algorithme d'arbre de décision extrêmement aléatoire. On peut donc conclure que les données physiologiques sont plus importantes que les données de mouvements et qu'aucune caractéristique de mouvement ne semble se distinguer pour l'expérience #2.

4.2.5 Matrices de confusion et qualité de la classification

Étant donné que l'importance des caractéristiques de mouvements est similaire et étant donnée la faible variation de la performance des classifications selon plusieurs tailles d'intervalles de temps, il est important d'analyser la qualité du meilleur algorithme identifié, soit l'arbre de décision extrêmement aléatoire.

La Figure 4.23 présente les matrices de confusion normalisée présentant la classification d'une forêt ayant 100 arbres de décisions aléatoires entraînés pour chaque condition (C et S) avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée, où a) inclus toutes les données disponibles (mouvements + physiologiques), b) inclus seulement les données de mouvements, c) inclus seulement les données de mouvement pour le haut du corps (tête + mains)

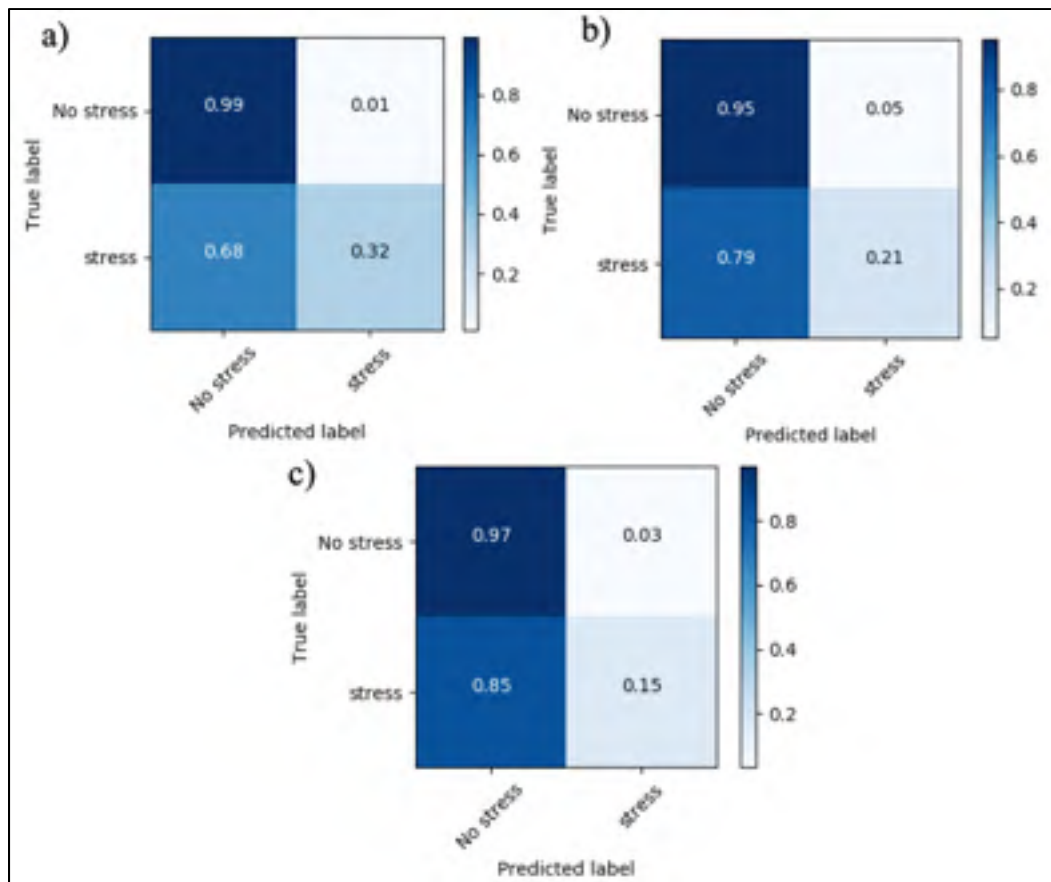


Figure 4.23 Matrices de confusion normalisée

En observant la Figure 4.23, on peut observer que l'algorithme d'arbre de décision aléatoire a beaucoup de difficulté à identifier correctement la situation stressante (<32%) par rapport à la situation non stressante (>95%). Ceci pourrait s'expliquer en partie par le fait que la condition non stressante est répétée 3 fois par les utilisateurs et donc a permis de renforcer l'entraînement pour identifier cette condition. Une autre hypothèse pour expliquer cette observation serait qu'il existe peu de caractéristiques de mouvements permettant d'identifier correctement une situation de stress. Les tableaux suivants offrent un résultat plus détaillé de la qualité des tests de classifications.

Le Tableau 4.13 présente le rapport de classification d'une forêt ayant 100 arbres de décisions aléatoires entraînés pour chaque condition (C et S) avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée, où toutes les données disponibles ont été utilisées.

Tableau 4.13 Rapport de classification où toutes les données disponibles ont été utilisées

	Précision	Sensibilité	Score F1	Nombres d'échantillons
Condition C	0.83	0.99	0.90	244
Condition S	0.88	0.31	0.45	72
Moyenne / Total	0.84	0.83	0.80	316

Le Tableau 4.14 présente le rapport de classification d'une forêt ayant 100 arbres de décisions aléatoires entraînés pour chaque condition (C et S) avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée, où seulement les données de mouvements ont été utilisées.

Tableau 4.14 Rapport de classification où seulement les données de mouvements ont été utilisées

	Précision	Sensibilité	Score F1	Nombres d'échantillons
Condition C	0.80	0.95	0.87	244
Condition S	0.56	0.21	0.30	72
Moyenne / Total	0.75	0.78	0.74	316

Le Tableau 4.15 présente le rapport de classification d'une forêt ayant 100 arbres de décisions aléatoires entraînés pour chaque condition (C et S) avec un intervalle de temps de 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée, où seulement les données de mouvements du haut du corps (tête + mains) ont été utilisées.

Tableau 4.15 Rapport de classification où seulement les données de mouvements du haut du corps (tête + mains) ont été utilisées

	Précision	Sensibilité	Score F1	Nombres d'échantillons
Condition C	0.78	0.97	0.87	246
Condition S	0.60	0.15	0.24	78
Moyenne / Total	0.74	0.77	0.72	324

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5.1 Questions de recherche

Suites aux différentes observations effectuées lors de l'analyse des résultats, il maintenant possible de répondre aux questions de recherche de ce projet.

1. Est-il possible de reconnaître un utilisateur de réalité virtuelle qui se trouve dans une situation calme ou une situation stressante à partir des données de mouvements provenant d'un système de réalité virtuelle et de données physiologiques?

Il est possible de reconnaître une situation calme d'une situation stressante à partir des mouvements d'un utilisateur en incluant toutes les données analysées (mouvements et physiologiques). Cependant, cette reconnaissance nécessite au préalable l'entraînement d'algorithmes à l'aide de données associées à ces situations calmes et stressantes. Une limitation du système utilisé pour faire cette reconnaissance est que les algorithmes ont été entraînés et testés spécifiquement pour nos deux expériences. Un tel système ne sera donc pas fonctionnel avec d'autres scénarios.

2. Quelles sont les caractéristiques de mouvements provenant d'un système de réalité virtuelle qui contribuent le plus à reconnaître un utilisateur qui se trouve dans une situation calme ou stressante?

Les analyses des résultats tendent à démontrer que les données physiologiques contribuent fortement à la reconnaissance des situations calmes et stressantes. Néanmoins, les données de mouvements ont fort probablement de l'information très utile qui n'ont pas pu être extraire dans ce projet. Une direction future sera de réduire le champ d'analyse des

mouvements, par exemple, détecter des variations dans des gestes spécifiques entre deux conditions.

3. Quels sont les algorithmes d'apprentissage machine qui offrent un meilleur taux de reconnaissance pour détecter si un utilisateur se trouve dans une situation calme ou stressante à partir des données de mouvements provenant d'un système de réalité virtuelle et des données physiologiques?

Les arbres de décisions ont bien performé dans les deux expériences et démontrent des résultats au-dessus de la moyenne des algorithmes utilisés. Néanmoins, les algorithmes d'apprentissage supervisé semblent avoir bien performé en général pour la deuxième expérience.

5.2 Classification des données

Les différents résultats de performances des classificateurs sont très variés, selon l'expérience, selon la taille de l'échantillonnage des données fournies aux algorithmes et selon le type d'algorithme utilisé. En incluant les données de tous les capteurs et de tous les participants, on obtient des performances entre 20% et 90% de taux de succès pour la classification de données de test parmi les dix algorithmes analysés avec un intervalle de temps à 1 seconde sur laquelle une moyenne a été calculée. Cependant cette performance tend à décliner avec l'augmentation de l'intervalle temporel des échantillons pour la plupart des algorithmes. Seul le classificateur "Gaussian Naive Bayes" semble connaître une légère augmentation de sa performance, mais sans jamais dépasser la barre des 50%. Dans les deux expériences, ce sont les deux algorithmes utilisant les arbres de décision qui ont le mieux performé, soit le classificateur arbre de décision et le classificateur en arbre extrêmement aléatoire. Cependant, les données physiologiques semblent avoir le plus grand impact de cette diminution de la performance avec un échantillonnage de différente durée puisque cette variation de performance n'est pas observée dans la performance des classificateurs en excluant ces données. Plusieurs algorithmes gagnent plutôt quelques points de pourcentage dans leur taux de succès avec des intervalles de temps

plus long. Mais le plus grand impact de l'absence des données physiologiques est la perte de performance globale pour tous ces algorithmes, pouvant diminuer les performances jusqu'à 20% selon les algorithmes analysés.

Ces résultats mènent à réfléchir à savoir quelles sont les données qui sont les plus pertinentes pour la modélisation prédictive des algorithmes. Les méthodes d'ensemble en apprentissage machine, dont les arbres de décision, nous ont permis de calculer l'importance relative de chacune des caractéristiques fournies avec l'importance de Gini. En analysant l'importance sur l'ensemble des mesures fournies, on peut remarquer que les données physiologiques (rythme cardiaque et l'activité électrodermale) ont la plus grande importance parmi l'ensemble des mesures suivi par certaines caractéristiques de mouvements directs (position, vitesse, orientation). Cependant, les résultats de l'expérience #2 démontrent qu'il n'y a pas de caractéristiques de mouvements qui se distinguent mieux que d'autres. Cela suggère que les caractéristiques de mouvement à analyser peuvent être très dépendantes à une expérience précise, et même être moins utiles d'une expérience à l'autre. Les résultats des deux expériences suggèrent néanmoins qu'il peut ne pas être nécessaire de calculer des mesures tel que l'accélération, le jerk ou la courbure des mouvements puisqu'ils ont offert peu de contributions dans la performance des algorithmes d'apprentissage machine. L'étude démontre ainsi l'utilité des données physiologiques et des caractéristiques d'ordre inférieur pour distinguer différentes conditions pour dans un intervalle de temps pouvant être aussi court qu'une seconde.

5.3 Limitation

Il existe plusieurs limitations à ce projet. D'abord, afin d'obtenir une performance acceptable dans la classification des algorithmes à travers les différentes expériences, il est nécessaire d'utiliser les données physiologiques des participants. Malheureusement, aucun système de réalité virtuelle n'intègre actuellement des capteurs permettant de capter ce genre d'informations. Il serait donc difficile d'atteindre des performances similaires avec seulement les systèmes de réalité virtuelle actuellement disponible pour les consommateurs moyens.

De plus, les mesures de mouvements sont très dépendantes des déplacements du sujet dans l'espace. Ce type de classification ne serait donc pas applicable pour des expériences assises tel que des simulateurs de vols, des simulateurs automobiles et des expériences vidéo panoramiques où le sujet ne fait qu'observer et effectuer des rotations de la tête.

Une autre limitation est que ce projet a été testé dans un laboratoire contrôlé. Le positionnement des émetteurs infrarouges a été optimisé et toutes surfaces réfléchissantes pouvant causer des problèmes pour les capteurs ont été cachées. La précision des différents capteurs peut donc être moindre dans un scénario réel. De plus, plusieurs autres variables peuvent influencer le degré d'immersion d'un utilisateur, comme la qualité des écouteurs utilisés, le bruit ambiant et la présence d'autres personnes. Tous ces facteurs peuvent réduire le degré d'immersion et ainsi réduire les réactions des utilisateurs face à l'expérience, réduisant par le fait même la précision de détection d'états émotionnels.

Une autre limitation de ce projet est la quantité de participants utilisés pour constituer une base de données servant à l'entraînement des algorithmes d'apprentissage machine. Ce projet de recherche mesure la performance en séparant de façon aléatoire les données en deux catégories : (1) pour l'entraînement et (2) pour effectuer des tests de performance. Les données utilisées pour les tests de performance peuvent donc être comparées avec les données d'un même sujet pour une même condition, ce qui peut influencer artificiellement à la hausse le niveau de performance. De plus, étant donnée la variabilité entre un sujet et un autre, le système n'a pas assez de donnée pour détecter les états psychologiques d'un nouvel utilisateur sans avoir effectué un entraînement sur celui-ci.

Enfin, l'expérience démontre plutôt un lien indirect entre les émotions des participants et leur mouvement. Il n'est donc pas possible d'utiliser un système de réalité virtuelle actuel afin de faire de la détection directe des émotions chez les utilisateurs. Par exemple, les mouvements de bras ne peuvent pas dire clairement si un participant est triste ou heureux, mais peuvent

déterminer un degré d'activité et faire une différence entre l'ennui et le stress de façon générale.

5.4 Leçons apprises

Évidemment, plusieurs leçons ont été apprises durant ce projet. L'une de ces leçons concerne l'installation d'un système de réalité virtuelle pour l'enregistrement de données. Certains problèmes d'occlusion avec les capteurs ont été rencontrés lors de la capture de donnée provoquant une perte d'information irrécupérable. Si le système HTC Vive est assez robuste pour des expériences de divertissements, il nécessite néanmoins une installation optimale pour obtenir une excellente fiabilité dans les données. En effet, si un capteur n'arrive plus à être dans le champ de projection d'un émetteur infrarouge, la position du capteur peut se retrouver momentanément au point d'origine de la zone de jeu ($x=0, y=0, z=0$). Dans d'autres cas, le système peut même utiliser un algorithme de prédictions de position et calculer le déplacement du capteur dans la même direction que le dernier mouvement enregistré, provoquant ainsi un faux déplacement qui ne reflète pas la situation réelle, causant l'enregistrement d'un déplacement erroné difficile à identifier en analysant les données. Le système peut corriger la situation après quelques fractions de seconde, faisant en sorte que l'utilisateur peut ne pas se rendre compte du problème, mais ceci est très problématique pour des calculs de mouvement tel que la courbure.

Une autre leçon apprise concerne l'environnement dans lequel on effectue la capture des données. Le local utilisé dans ce projet pour effectuer l'expérience contenait plusieurs télévisions. L'écran des téléviseurs étant réfléchissants, la lumière infrarouge projetée par les émetteurs du système HTC Vive pouvait y être réfléchi et atteindre les capteurs. Ceci faisant en sorte, que du point de vue des capteurs, il pouvait y avoir plus de deux sources d'émissions infrarouges visibles en incluant l'image des émetteurs dans les écrans. La zone de déplacement physique pouvait alors se recalibrer et déplacer virtuellement les capteurs en fonction de la nouvelle position de l'émetteur imaginaire, causant ainsi des erreurs de positions importantes.

Un autre élément auquel il a été nécessaire de s'ajuster est l'animation de l'avatar représentant un participant dans l'environnement virtuel. Le prototype expérimental du projet incluait un avatar animé avec la technique de cinématique inverse en utilisant 6 points de références, soit la position des 6 capteurs (têtes, mains (2), pieds (2) et bassin). Cette animation était problématique, car les mouvements obtenus n'étaient pas assez réalistes pour un des objectifs initiaux, soit d'utiliser ces animations et de les classer selon différents niveaux de stress par d'autres participants. La leçon ici est qu'un système de captures de mouvements de haute qualité est nécessaire afin de reproduire l'ensemble des signaux qui peuvent être transmis par la communication non verbale.

Lors des tests du prototype de l'expérience #1, les participants devaient se déplacer tout en évitant que les prismes touchent à un mur laser. Cette contrainte a été créée pour faire varier la difficulté des séances de réalité virtuelle. Cependant, la réaction et le comportement des participants face au mur étaient tellement distingués et variés que cela pouvait causer plus de différence dans les mouvements pour une même condition comparativement aux mouvements avec d'autres conditions. Cela a mis au jour l'importance de s'assurer que l'expérience soit bien conçue de sorte à ne pas influencer négativement la fiabilité des données récoltées. De par nature, on s'attend à ce que chaque humain aille un comportement et une approche différente face aux tâches demandées, mais il est important de vérifier que ces différences ne soient pas trop élevées pour une même expérience. Autrement, les mesures ne sont pas valides.

5.5 Recommandations pour un concepteur

Considérant les différents résultats de notre projet et ses limitations, il est possible de formuler quelques recommandations pour un concepteur qui voudrait développer un système de reconnaissance semblable à ce projet. Une première recommandation serait de cibler un ou des systèmes de réalité virtuelle de bonne qualité tels que l'Oculus Rift et le HTC Vive. Ceux-ci offrent un bon niveau d'immersion pouvant procurer l'effet de présence qui peut influencer les comportements de ces utilisateurs. Ces systèmes permettent également d'offrir une excellente précision au niveau de la capture de données de mouvements. Une autre recommandation serait

de récupérer des données physiologiques sur ces utilisateurs. Les résultats de ce projet ont démontré que les données physiologiques sont très importantes afin de bien classer les informations et de permettre de déduire l'état émotionnel. Inutile cependant de capturer ces données avec une fréquence élevée. Une fréquence de capture des données physiologiques à 1Hz est suffisante pour ce type de données, car le rythme cardiaque n'accélérera pas aussi rapidement dans des conditions normales de réalité virtuelle tout comme la variation du niveau de sudation de la peau. Pour ce qui est des données de mouvements, il est recommandé de capturer avec une fréquence suffisamment élevée afin d'éviter de perdre des détails importants pour le calcul de mesures indirectes (accélération, énergie cinétique, courbure, symétrie). Dans cette étude, nous avons utilisé la fréquence maximale disponible par le HTC Vive soit 100Hz. Malgré la précision des données fournies par les systèmes de réalité virtuelle, il est possible que certaines données aberrantes soient enregistrées à cause de différents problèmes comme l'occlusion des capteurs ou une surcharge du système. Il est donc important de filtrer ces données à l'aide de techniques de traitement de signaux. Cette étude a aussi démontré que certaines caractéristiques telles que l'orientation de la tête (azimut et élévation) et la position relative des membres par rapport au centre de masse de l'utilisateur sont importantes. Il est tout de même recommandé à un concepteur de vérifier l'importance des caractéristiques pour son application. Notre projet est limité à des conditions particulières et ne démontre pas que ces caractéristiques de mouvements ont la même importance de façon général dans d'autres expériences de réalité virtuelle. Néanmoins, si les caractéristiques peuvent changer d'une application à l'autre, notre étude démontre quand même une constante au niveau des meilleurs algorithmes d'apprentissage machine utilisés peu importe la variation des caractéristiques. Ainsi, il est recommandé à un concepteur d'utiliser des méthodes de classifications par ensemble tel que les arbres de décisions.

5.6 Directions futures

Il serait intéressant d'utiliser d'autres capteurs tels que le suivi des yeux ou un casque EEG (Électroencéphalographie) afin de vérifier s'il est possible d'établir des liens semblables entre différentes expériences et les émotions exprimées par les participants. En effet, il existe

actuellement des systèmes de réalité virtuelle intégrant le suivi des yeux. Ce type d'analyse pourrait alors devenir possible avec les futures versions commerciales.

Un autre travail intéressant à accomplir serait de perfectionner l'utilisation des algorithmes de classifications afin de les paramétrer de façon plus précise à ce problème particulier. La présente étude a utilisé plusieurs algorithmes sans vérifier quels sont exactement les meilleurs paramètres pour chacun d'entre eux afin d'optimiser les résultats. Il serait alors possible d'approfondir la recherche à ce sujet afin d'augmenter la performance de ceux-ci. De plus, il serait intéressant de prendre en compte l'aspect temporel des données utilisées pour l'apprentissage machine. Puisque les échantillons représentent une série chronologique d'enregistrements espacés de façon plus ou moins régulière dans le temps, il serait possible de faire des prédictions de façon plus précise en analysant et en détectant des patrons de mouvements pour chaque catégorie de classification. Pour rappel, une série chronologique est une série de points de données indexés dans l'ordre chronologique. Le plus souvent, une série temporelle est une séquence prise à des points successifs espacés régulièrement dans le temps. C'est donc une séquence de données en temps discret.

CONCLUSION

Cette étude démontre qu'il existe bien un lien entre les mesures de mouvements, les mesures physiologiques, les états psychologiques et les expériences des participants. Nos résultats démontrent qu'en combinant différents capteurs de mouvements avec la capture du rythme cardiaque et de la conductivité de la peau des participants, les algorithmes d'apprentissage machine de types arbre de décision peuvent détecter si un échantillon de quelques secondes provient d'une expérience stressante ou d'une expérience plus calme avec une précision jusqu'à environ 90%. S'il est bien possible de reconnaître un utilisateur de réalité virtuelle qui se trouve dans une situation calme ou une situation stressante, cette étude n'a pas permis de démontrer qu'il est possible de généraliser cette reconnaissance à toutes les expériences de réalité virtuelle.

Cette étude a également démontré que les mesures physiologiques ont une importance plus grande que les mesures de mouvements pour la classification. Nos résultats démontrent également qu'il peut y avoir une grande différence entre les utilisateurs et entre les expériences virtuelles. Nos conseils pour un concepteur qui voudrait développer un système de classification semblable au nôtre seraient d'abord d'utiliser si possible les données physiologiques des utilisateurs comme le rythme cardiaque et l'activité électrodermale. Une fréquence de capture à 1 Hz est suffisante pour ces données. Pour ce qui est des données de mouvements, il est recommandé de capturer avec la fréquence la plus élevée afin d'obtenir une meilleure précision dans les calculs des mesures indirectes (énergie cinétique, courbure, symétrie, etc.). Évidemment, il est important de filtrer les données aberrantes pouvant résulter d'un problème dans la capture tel que l'occlusion des capteurs. L'orientation de la tête (azimut et élévation) et la position relative des membres par rapport au centre de masse de l'utilisateur sont les caractéristiques de mouvement les plus importantes. Cependant, cette importance peut varier d'une application à l'autre en fonction des tâches demandées aux utilisateurs. De plus, les caractéristiques de mouvement d'ordre supérieur telles que l'accélération et le jerk ne semblent pas apporter beaucoup de valeur à la classification.

Cette étude a aussi permis de déterminer, parmi 10 algorithmes d'apprentissage machine, laquelle offre un meilleur taux de reconnaissance pour détecter si un utilisateur se trouve dans une situation calme ou stressante à partir des données de mouvements d'un système de réalité virtuelle. L'utilisation d'arbre de décision, voir même d'une forêt d'arbre de décision est recommandé comme algorithme d'apprentissage machine.

Ce qui est certain, c'est que la technologie supportant la réalité virtuelle ne cesse de s'améliorer, ouvrant la porte à de nouvelles applications et de nouvelles données permettant d'analyser d'avantages les utilisateurs. L'intelligence artificielle pourra non seulement comprendre de mieux en mieux l'être humain, mais pourra également s'incarner à travers des avatars pour offrir de l'interaction plus avancée. La reconnaissance des changements comportementaux des utilisateurs de réalité virtuelle n'est donc que le début d'une plus grande aventure qu'est le développement des mondes virtuels.

ANNEXE I

QUESTIONNAIRE SUR L'ANALYSE ÉMOTIONNELLE POUR CHAQUE CONDITION

1. Est-ce qu'il y a eu un moment dans l'expérience où vous avez voulu abandonner?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

2. À quel point vous aviez l'intention de réussir les tâches demandées dans le jeu?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

3. À quel point tous vos sens (ouïe, odorat, toucher, vision, goût) étaient engagés dans le jeu?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

4. Avez-vous ressenti un attachement émotionnel avec le jeu?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

5. Avez-vous ressenti du stress en réalisant les tâches demandées dans le jeu?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

6. Avez-vous ressenti de la frustration en réalisant les tâches demandées dans le jeu?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

7. Avez-vous ressenti de la joie en réalisant les tâches demandées dans le jeu?

PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

8. Avez-vous ressenti de la peur en réalisant les tâches demandées dans le jeu?

PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

9. Avez-vous ressenti de la surprise en réalisant les tâches demandées dans le jeu?

PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

10. Avez-vous ressenti du dégoût en réalisant les tâches demandées dans le jeu?

PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

26. À un moment donné, vous êtes-vous retrouvé tellement impliqué dans l'expérience au point d'avoir l'intention de parler au jeu directement?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

27. Dans vos déplacements, croyez-vous avoir bien exploité l'espace de jeu permis par l'expérience?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

28. Dans quelle mesure aviez-vous l'impression de vous déplacer dans le jeu selon votre propre volonté?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

29. Dans quelle mesure les déplacements dans l'environnement virtuel étaient convaincants?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

30. Dans quelle mesure pouvez-vous déplacer ou manipuler des objets dans l'environnement virtuel?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akiduki, Hironori, Suetaka Nishiike, Hiroshi Watanabe, Katsunori Matsuoka, Takeshi Kubo et Noriaki Takeda. 2003. « Visual-vestibular conflict induced by virtual reality in humans ». *Neuroscience Letters*, vol. 340, n° 3, p. 197-200. <[https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3940\(03\)00098-3](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3940(03)00098-3)>.
- Alborno, Paolo, Stefano Piana, Maurizio Mancini, Radoslaw Niewiadomski, Gualtiero Volpe et Antonio Camurri. 2016. « Analysis of intrapersonal synchronization in full-body movements displaying different expressive qualities ». In *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. (2016), p. 136-143. ACM.
- Argelaguet, Ferran, Ludovic Hoyet, Michaël Trico et Anatole Lécuyer. 2016. « The role of interaction in virtual embodiment: Effects of the virtual hand representation ». In *Virtual Reality (VR), 2016 IEEE*. (2016), p. 3-10. IEEE.
- Azuma, Ronald, Yohan Baillot, Reinhold Behringer, Steven Feiner, Simon Julier et Blair MacIntyre. 2001. « Recent advances in augmented reality ». *IEEE computer graphics and applications*, vol. 21, n° 6, p. 34-47.
- Azuma, Ronald T. 1997. « A survey of augmented reality ». *Presence: Teleoperators and virtual environments*, vol. 6, n° 4, p. 355-385.
- Bailenson, Jeremy N et Jim Blascovich. 2004. « Avatars ». In *Encyclopedia of human-computer interaction*, Berkshire Publishing Group. (2004). Citeseer.
- Baños, Rosa María, Cristina Botella, Mariano Alcañiz, Víctor Liaño, Belén Guerrero et Beatriz Rey. 2004. « Immersion and emotion: their impact on the sense of presence ». *CyberPsychology & Behavior*, vol. 7, n° 6, p. 734-741.
- Barrientos, Francesca. 2000. « Continuous control of avatar gesture ». In *Proceedings of the 2000 ACM workshops on Multimedia*. (2000), p. 5-8. ACM.
- Benford, Steve, John Bowers, Lennart E Fahlén, Chris Greenhalgh et Dave Snowdon. 1995. « User embodiment in collaborative virtual environments ». In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. (1995), p. 242-249. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- Biocca, Frank, Chad Harms et Jenn Gregg. 2001. « The networked minds measure of social presence: Pilot test of the factor structure and concurrent validity ». In *4th annual international workshop on presence, Philadelphia, PA*. (2001), p. 1-9.
- Blanchard, Chuck, Scott Burgess, Young Harvill, Jaron Lanier, Ann Lasko, Mark Oberman et Mike Teitel. 1990. *Reality built for two: a virtual reality tool*. ACM.

- Boas, YAGV. 2013. « Overview of virtual reality technologies ». In *Interactive Multimedia Conference. Southampton*. (2013).
- Boff, Kenneth R, Lloyd Kaufman et James P Thomas. 1986. « Handbook of perception and human performance ».
- Botvinick, Matthew et Jonathan Cohen. 1998. « Rubber hands' feel'touch that eyes see ». *Nature*, vol. 391, n° 6669, p. 756.
- Bowman, Doug A et Ryan P McMahan. 2007. « Virtual reality: how much immersion is enough? » *Computer*, vol. 40, n° 7, p. 36-43.
- Bradley, Margaret M et Peter J Lang. 1994. « Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential ». *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, vol. 25, n° 1, p. 49-59.
- Bricken, William. 1990. « Virtual Reality: Directions of Growth Notes from the SIGGRAPH'90 Panel ». In *Virtual Reality: Directions of Growth*. (1990). <<ftp://ftp.hitl.washington.edu/pub/publications/papers/m-90-1.html>>.
- Brown, Emily et Paul Cairns. 2004. « A grounded investigation of game immersion ». In *Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA 2004, April 24, 2004 - April 29, 2004*. (2004), p. 1297-1300. Association for Computing Machinery. <<https://doi.org/10.1145/985921.986048>>.
- Bu, Pawel, Filip Gorski, Radoslaw Wichniarek, Wieslaw Kuczko, Adam Hamrol et Przemyslaw Zawadzki. 2015. « Application of Professional and Low-cost Head Mounted Devices in Immersive Educational Application ». In *3rd International Conference on Virtual and Augmented Reality in Education, VARE 2015*. (2015), p. 173-181. Elsevier. <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.235>>.
- Bura, Stéphane. 2008. « Emotion Engineering in Videogames ». <<http://www.stephanebura.com/emotion/>>.
- Calvo, Rafael A et Sidney D'Mello. 2010. « Affect Detection: An Interdisciplinary Review of Models, Methods, and Their Applications ». *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 1, n° 1, p. 18-37. <<https://doi.org/10.1109/T-AFFC.2010.1>>. Consulté le 29 août 2016.
- Castellano, Ginevra, Santiago D. Villalba et Antonio Camurri. 2007. « Recognising Human Emotions from Body Movement and Gesture Dynamics ». In *Affective Computing and Intelligent Interaction*, p. 71-82. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74889-2_7>. Consulté le 29 août 2016.
- Chifor, Mihai et Teodor Stefanut. 2015. « Immersive Virtual Reality application using Google Cardboard and Leap Motion technologies ». In *Romanian Conference on Human-Computer Interaction*. (2015), p. 114-120.

- Coz, D, D Henry, C Plagemann et B Smus. 2016. *Google Cardboard Patent Virtual reality headset*. <<https://www.google.com.sl/patents/USD750074>>.
- Csikszentmihalyi, Mihalyi. 1990. *Flow: The psychology of optimal experience*. Harper & Row, 303 p.
- Darwin, Charles, Paul Ekman et Phillip Prodger. 1998. *The expression of the emotions in man and animals*. Oxford University Press, USA.
- Dellaert, Frank, Thomas Polzin et Alex Waibel. 1996. « Recognizing emotion in speech ». In *Spoken Language, 1996. ICSLP 96. Proceedings., Fourth International Conference on*. (1996), p. 1970-1973. IEEE.
- Desai, Pooja Nikhil Parth Rajesh, Pooja Nikhil Parth Rajesh Desai, Komal Deepak Ajmera et Khushbu Mehta. 2014. « A review paper on oculus rift-a virtual reality headset ». *arXiv preprint arXiv:1408.1173*.
- Diemer, Julia, Georg W Alpers, Henrik M Peperkorn, Youssef Shiban et Andreas Mühlberger. 2015. « The impact of perception and presence on emotional reactions: a review of research in virtual reality ». *Frontiers in psychology*, vol. 6, p. 26. <<http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2015.00026/full>>.
- Drachen, Anders, Lennart Erik Nacke, Georgios Yannakakis et Anja Lee Pedersen. 2010. « Correlation between heart rate, electrodermal activity and player experience in first-person shooter games ». In *Proc. ACM SIGGRAPH Symposium on Video Games - Sandbox '10*. (2010), p. 49-54. ACM Press. <<https://doi.org/10.1145/1836135.1836143>>. Consulté le 29 août 2016.
- Fabri, Marc, David J Moore et Dave J Hobbs. 1999. « The emotional avatar: Non-verbal communication between inhabitants of collaborative virtual environments ». In *International Gesture Workshop*. (1999), p. 269-273. Springer.
- Faiola, Anthony, Christine Newlon, Mark Pfaff et Olga Smyslova. 2013. « Correlating the effects of flow and telepresence in virtual worlds: Enhancing our understanding of user behavior in game-based learning ». *Computers in Human Behavior*, vol. 29, n° 3, p. 1113-1121.
- Finn, Bernard et Brian Bowers. 2003. *Sir Charles Wheatstone, FRS, 1802-1875*.
- Flynn, Carl. 2014. *An open source framework for CAVE automatic virtual environments*.
- Fontaine, Gary. 1992. « The experience of a sense of presence in intercultural and international encounters ». *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, vol. 1, n° 4, p. 482-490. <<https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.4.482>>.

- Frome, Jonathan. 2007. « Eight ways videogames generate emotion ». *DiGRA International Conference: Situated Play*, vol. 4, p. 831-835. <<http://www.digra.org/dl/db/07311.25139.pdf>>.
- de Gelder, Beatrice. 2009. « Why bodies? Twelve reasons for including bodily expressions in affective neuroscience ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, n° 1535, p. 3475-3484. <<http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/364/1535/3475.short>>.
- Giakoumis, Dimitris, Athanasios Vogianou, Ilkka Kosunen, Dieter Devlaminck, Minkyu Ahn, Anne Marie Burns, Fatemeh Khademi, Konstantinos Moustakas et Dimitrios Tzovaras. 2009. « Multimodal monitoring of the behavioral and physiological state of the user in interactive VR games ». *on Multimodal Interfaces eNTERFACE'09*, p. 1. <https://scholar.google.ca/scholar?hl=en&as_sdt=0,5&q=giakoumis+2009+multimodal>.
- Gibson, James J. 2014. *The ecological approach to visual perception: classic edition*. Psychology Press.
- Gunes, Hatice et Maja Pantic. 2010. « Automatic, Dimensional and Continuous Emotion Recognition ». *International Journal of Synthetic Emotions*, vol. 1, p. 68-99. <<http://scholar.google.ca/scholar?q=Gunes+Pantic+Automatic+Dimensional+Continuous+Emotion+Recognition>>. Consulté le 12 septembre 2016.
- Gunes, Hatice, Massimo Piccardi et Maja Pantic. 2008. « From the Lab to the Real World: Affect Recognition Using Multiple Cues and Modalities ». In *Affective Computing: Focus on Emotion Expression, Synthesis, and Recognition*, p. 185-218. <<http://scholar.google.ca/scholar?q=Gunes+Piccardi+Pantic+Lab+Real+World+Affect+Recognition+Using+Multiple+Cues+Modalities>>. Consulté le 12 septembre 2016.
- Guye-Vuillème, Anthony, Tolga K Capin, S Pandzic, N Magnenat Thalmann et Daniel Thalmann. 1999. « Nonverbal communication interface for collaborative virtual environments ». *Virtual Reality*, vol. 4, n° 1, p. 49-59.
- Heeter, Carrie. 1992. « Being there: The subjective experience of presence ». *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 1, n° 2, p. 262-271.
- Heilig, Morton Leonard. 1962. *Sensorama simulator*. <<https://www.google.com/patents/US3050870>>.
- Hernandez, Javier, Pablo Paredes, Asta Roseway, Mary Czerwinski et A. Kolakowska. 2014. « Under pressure: sensing stress of computer users ». In *Proc. CHI*. (juin 2014), p. 51-60. ACM Press. <<https://doi.org/10.1145/2556288.2557165>>. Consulté le 29 août 2016.

- Hinckley, Ken, Randy Pausch, John C Goble et Neal F Kassell. 1994. « Passive real-world interface props for neurosurgical visualization ». In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. (1994), p. 452-458. ACM.
- Huang, Milton P et Norman E Alessi. 1999. « Mental health implications for presence ». *CyberPsychology & Behavior*, vol. 2, n° 1, p. 15-18.
- International Society for Presence Research. 2000. « The Concept of Presence: Explication Statement ». <<https://smcsites.com/ispr/>>.
- Jang, D P, I Y Kim, S W Nam, B K Wiederhold, M D Wiederhold et S I Kim. 2002. « An investigation of immersiveness in virtual reality exposure using physiological data ». In *Medicine Meets Virtual Reality 02/10. Digital Upgrades: Applying Moore's Law to Health, 23-26 Jan. 2002*. (2002), p. 207-213. IOS Press.
- Jayaram, Sankar, Hugh I Connacher et Kevin W Lyons. 1997. « Virtual assembly using virtual reality techniques ». *Computer-Aided Design*, vol. 29, n° 8, p. 575-584.
- Jennett, C, A L Cox, P Cairns, S Dhoparee, A Epps, T Tijs et A Walton. 2008. « Measuring and defining the experience of immersion in games ». *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 66, n° 9, p. 641-661. <<https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2008.04.004>>.
- Jerald, Jason. 2015. *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*. Morgan & Claypool.
- Kapur, Asha Ajay, Asha Ajay Kapur, Naznin Virji-Babul, George Tzanetakis et Peter F. Driessen. 2005. « Gesture-Based Affective Computing on Motion Capture Data ». p. 1-7. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/11573548_1>. Consulté le 11 septembre 2016.
- Karg, Michelle, Ali-Akbar Samadani, Rob Gorbet, Kolja Kühnlenz, Jesse Hoey et Dana Kulić. 2013. « Body Movements for Affective Expression: A Survey of Automatic Recognition and Generation ». *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 4, n° 4, p. 341-359. <<https://doi.org/10.1109/T-AFFC.2013.29>>. Consulté le 11 septembre 2016.
- Kavakli, Manolya, Eric Malbos, Ronald M Rapee et Manolya Kavakli. 2012. « Behavioral Presence Test in Threatening Virtual Environments ». *Presence*, vol. 21, n° 3, p. 268-280.
- Kelly, Kevin, Adam Heilbrun et Barbara Stacks. 1989. « Virtual reality: an interview with Jaron Lanier ». *Whole Earth Review*, vol. 64, n° 108-120, p. 2.
- Kennedy, Robert S, Norman E Lane, Kevin S Berbaum et Michael G Lilienthal. 1993. « Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness ». *The international journal of aviation psychology*, vol. 3, n° 3, p. 203-220.

- Kilteni, Konstantina, Raphaela Groten et Mel Slater. 2012. « The sense of embodiment in virtual reality ». *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 21, n° 4, p. 373-387.
- Kim, M, Y Bang et J Kim. 2016. *GearVr Patent Head-mounted display device*. Google Patents. <<https://www.google.com/patents/USD749580>>.
- Kleinsmith, Andrea et Nadia Bianchi-Berthouze. 2013. « Affective Body Expression Perception and Recognition: A Survey ». *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 4, n° 1, p. 15-33. <<https://doi.org/10.1109/T-AFFC.2012.16>>. Consulté le 11 septembre 2016.
- Kleinsmith, Andrea, Nadia Bianchi-Berthouze et A. Steed. 2011. « Automatic Recognition of Non-Acted Affective Postures ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 41, n° 4, p. 1027-1038. <<https://doi.org/10.1109/TSMCB.2010.2103557>>. Consulté le 12 septembre 2016.
- Kleinsmith, Andrea, T Fushimi et Nadia Bianchi-Berthouze. 2005. « An incremental and interactive affective posture recognition system ». In *International Workshop on Adapting the Interaction Style to Affective Factors*. (2005), p. 378-387. <<http://discovery.ucl.ac.uk/149645/>>. Consulté le 11 septembre 2016.
- Kober, Silvia Erika et Christa Neuper. 2013. « Personality and presence in virtual reality: does their relationship depend on the used presence measure? » *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 29, n° 1, p. 13-25.
- Kořakowska, A. 2013. « A review of emotion recognition methods based on keystroke dynamics and mouse movements ». In *International Conference on Human System Interactions (HSI)*. (juin 2013), p. 548-555. IEEE. <<https://doi.org/10.1109/HSI.2013.6577879>>. Consulté le 29 août 2016.
- Lindeman, Robert W. 2016. « A low-cost, low-latency approach to dynamic immersion in occlusive head-mounted displays ». In *2016 IEEE Virtual Reality (VR)*. (mars 2016), p. 221-222. IEEE. <<https://doi.org/10.1109/VR.2016.7504733>>. Consulté le 27 septembre 2016.
- Lok, Benjamin, Samir Naik, Mary Whitton et Frederick P Brooks. 2003. « Effects of handling real objects and self-avatar fidelity on cognitive task performance and sense of presence in virtual environments ». *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 12, n° 6, p. 615-628.
- Lombard, Matthew, Theresa B Ditton, Daliza Crane, Bill Davis, Gisela Gil-Egui, Karl Horvath, Jessica Rossman et S Park. 2000. « Measuring presence: A literature-based approach to the development of a standardized paper-and-pencil instrument ». In *Third international workshop on presence, delft, the netherlands*. (2000), p. 2-4.

- Luckey, P, B I Trexler, G England et J McCauley. 2014. *Oculus Rift Patent Virtual reality headset*. <<http://www.google.com.sl/patents/USD701206>>.
- Lugrin, Jean-Luc, Maximilian Wiedemann, Daniel Bieberstein et Marc Erich Latoschik. 2015. « Influence of avatar realism on stressful situation in VR ». In *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*. (2015), p. 227-228. IEEE.
- Mavridou, Ifigeneia, James T McGhee, Mahyar Hamedi, Mohsen Fatoorechi, Andrew Cleal, Emili Ballaguer-Balester, Ellen Seiss, Graeme Cox et Charles Nduka. 2017. « FACETEQ interface demo for emotion expression in VR ». In *Virtual Reality (VR), 2017 IEEE*. (2017), p. 441-442. IEEE.
- Meehan, Michael. 2001. *Physiological reaction as an objective measure of presence in virtual environments*.
- Meehan, Michael, Brent Insko, Mary Whitton et Frederick P Brooks Jr. 2002. « Physiological measures of presence in stressful virtual environments ». In *ACM Transactions on Graphics; Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002, July 23, 2002 - July 26, 2002*. (2002), p. 645-652. Association for Computing Machinery. <<https://doi.org/10.1145/566654.566630>>.
- Mercurio, Philip J, Thomas Erickson, D Diaper, D Gilmore, G Cockton et B Shackel. 1990. « Interactive scientific visualization: An assessment of a virtual reality system. » In *INTERACT*. (1990), p. 741-745.
- Milgram, Paul et Fumio Kishino. 1994. « A taxonomy of mixed reality visual displays ». *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, vol. 77, n° 12, p. 1321-1329.
- Mohler, Betty J, Sarah H Creem-Regehr, William B Thompson et Heinrich H Bühlhoff. 2010. « The effect of viewing a self-avatar on distance judgments in an HMD-based virtual environment ». *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 19, n° 3, p. 230-242.
- Molinari, Enrico, Giuseppe Riva et Brenda K Wiederhold. 1998. *Virtual Environments in Clinical Psychology and Neuroscience: Methods and Techniques in Advanced Patient-therapist Interaction*. IOS Press, 249 p. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=0-Nzrj_DWL4C&pgis=1>.
- Morie, Jacquelyn F, Josh Williams, Aimee Dozois et Donat-Pierre Luigi. 2005. *The Fidelity of Feel': Emotional Affordance in Virtual Environments*. DTIC Document.
- Murray, Janet Horowitz. 1997. *Hamlet on the Holodeck: The Future of Narrative in Cyberspace*. The Free Press, 324 p.

- Nacke, Lennart Erik. 2009. « Affective Ludology: Scientific Measurement of User Experience in Interactive Entertainment ». Blekinge Institute of Technology. <<https://scholar.google.ca/scholar?q=nacke+affective+ludology+scientific+measurement+user+experience+interactive+entertainment>>.
- Nacke, Lennart Erik, Michael Kalyn, Calvin Lough et Regan Lee Mandryk. 2011. « Biofeedback game design: using direct and indirect physiological control to enhance game interaction ». In *Proc. CHI*. (2011), p. 103-112. ACM Press. <<https://doi.org/10.1145/1978942.1978958>>. Consulté le 29 août 2016.
- Nielsen, Curtis W. 2006. « Using augmented virtuality to improve human-robot interactions ». Brigham Young University-Provo, 353 p. <<http://hdl.lib.byu.edu/1877/etd1170>>.
- Nijholt, Anton et David Traum. 2005. « The virtuality continuum revisited ». In *CHI'05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. (2005), p. 2132-2133. ACM.
- Patrick, E, D Cosgrove, A Slavkovic, J A Rode, T Verratti et G Chiselko. 2000. « Using a large projection screen as an alternative to head-mounted displays for virtual environments ». In *Proceedings of CHI 2000, 1-6 April 2000*. (2000), p. 478-485. ACM. <<https://doi.org/10.1145/332040.332479>>.
- Pfeiffer, T, A Schmidt et P Renner. 2016. *Detecting movement patterns from inertial data of a mobile head-mounted-display for navigation via walking-in-place*. 2016 IEEE Virtual Real. <<https://doi.org/10.1109/VR.2016.7504754>>.
- Piana, Stefano, Alessandra Staglianò, Antonio Camurri et Francesca Odone. 2013. « A set of full-body movement features for emotion recognition to help children affected by autism spectrum condition ». In *IDGEI International Workshop*. (2013). <<https://scholar.google.ca/scholar?q=piana+%22set+of+full-body+movement+features+for+emotion+recognition+to+help%22>>.
- Piana, Stefano, Alessandra Staglianò, Francesca Odone et Antonio Camurri. 2016. « Adaptive Body Gesture Representation for Automatic Emotion Recognition ». *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, vol. 6, n° 1, p. 1-31. <<https://doi.org/10.1145/2818740>>. Consulté le 10 septembre 2016.
- Powell, Wendy Anne, Vaughan Powell, Phillip Brown, Marc Cook et Jahangir Uddin. 2016. « Getting around in Google Cardboard-exploring navigation preferences with low cost mobile VR ».
- Von Der Pütten, Astrid M, Jennifer Johannes Klatt, Simon Ten Broeke, Roderick McCall, Nicole C Krämer, Richard Wetzel, Lisa Blum, Leif Oppermann et Jennifer Johannes Klatt. 2012. « Subjective and behavioral presence measurement and interactivity in the collaborative augmented reality game TimeWarp ». *Interacting with computers*, vol. 24, n° 4, p. 317-325.

- Raskar, Ramesh, Greg Welch et Henry Fuchs. 1998. « Spatially augmented reality ». In *First IEEE Workshop on Augmented Reality (IWAR'98)*. (1998), p. 11-20. CiteSeer.
- Riva, Giuseppe, Fabrizia Mantovani, Claret Samantha Capideville, Alessandra Preziosa, Francesca Morganti, Daniela Villani, Andrea Gaggioli, Cristina Botella et Mariano Alcañiz. 2007. « Affective interactions using virtual reality: the link between presence and emotions ». *CyberPsychology & Behavior*, vol. 10, n° 1, p. 45-56. <<https://doi.org/10.1089/cpb.2006.9993>>. Consulté le 11 septembre 2016.
- Sanchez-Vives, M V et M Slater. 2005. « From presence to consciousness through virtual reality ». *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 6, n° 4, p. 332-339. <<https://doi.org/1038/nrn1651>>.
- Satava, Richard M. 1993. « Virtual reality surgical simulator ». *Surgical endoscopy*, vol. 7, n° 3, p. 203-205.
- Savva, Nikolaos, Alfonsina Scarinzi et Nadia Bianchi-Berthouze. 2012. « Continuous Recognition of Player's Affective Body Expression as Dynamic Quality of Aesthetic Experience ». *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, vol. 4, n° 3, p. 199-212. <<https://doi.org/10.1109/TCIAIG.2012.2202663>>. Consulté le 12 septembre 2016.
- Shimizu, Junichi et George Chernyshov. 2016. « Eye movement interactions in google cardboard using a low cost EOG setup ». In *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct*. (2016), p. 1773-1776. ACM.
- De Silva, Liyanage C, Tsutomu Miyasato, Ryohei Nakatsu et Facial Emotion Recognition Using Multi. 1997. « Facial Emotion Recognition Using Multi-modal Information ».
- Slater, M. 1999. « Measuring presence: a response to the Witmer and Singer presence questionnaire ». *Presence*, vol. 8, n° 5, p. 560-565. <<https://doi.org/10.1162/105474699566477>>.
- Slater, M, B Lotto, M M Arnold et M V Sanchez-Vives. 2009. « How we experience immersive virtual environments: The concept of presence and its measurement ». *Anuario de Psicología*, vol. 40, n° 2, p. 193-210. <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-73449126510&partnerID=40&md5=771a157a43c703148793e8850130ea04>>.
- Slater, M, M Usuh et Y Chrysanthou. 1995. « The influence of dynamic shadows on presence in immersive virtual environments ». In *Proceedings of Eurographics Workshops. Virtual Environments '95, 1993; Sept. 1995*. (1995), p. 8-21. Springer-Verlag.
- Slater, Mel, J Howell, Anthony Steed, David-Paul Pertaub et Maia Garau. 2000. « Acting in virtual reality ». In *Proceedings of the third international conference on Collaborative virtual environments*. (2000), p. 103-110. ACM.

- Slater, Mel, Daniel Pérez Marcos, Henrik Ehrsson et Maria V Sanchez-Vives. 2008. « Towards a digital body: the virtual arm illusion ». *Frontiers in human neuroscience*, vol. 2, p. 6.
- Slater, Mel, Martin Usoh et Anthony Steed. 1994. « Depth of presence in virtual environments ». *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 3, n° 2, p. 130-144.
- Slater, Mel et Sylvia Wilbur. 1997. « A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments ». *Presence: Teleoperators and virtual environments*, vol. 6, n° 6, p. 603-616. <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2871098>>.
- Steed, Anthony, Ye Pan, Fiona Zisch et William Steptoe. 2016. « The impact of a self-avatar on cognitive load in immersive virtual reality ». In *Virtual Reality (VR), 2016 IEEE*. (2016), p. 67-76. IEEE.
- Steuer, Jonathan. 1992. « Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence ». *Journal of communication*, vol. 42, n° 4, p. 73-93.
- Sutherland, Ivan E. 1965. « The ultimate display ». *Multimedia: From Wagner to virtual reality*.
- Sweetser, Penelope et Peta Wyeth. 2005. « GameFlow: a model for evaluating player enjoyment in games ». *Computers in Entertainment (CIE)*, vol. 3, n° 3, p. 3.
- Teitel, Michael A. 1990. « The Eyephone: A head-mounted stereo display ». In *SC-DL tentative*. (1990), p. 168-171. International Society for Optics and Photonics.
- Usoh, M, K Arthur, R Bastos, A Steed, M Slater et F P Brooks Jr. 1999. « Walkingwalking-in-placeflying, in virtual environments ». In *Proceedings of SIGGRAPH 99: 26th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 8-13 Aug. 1999*. (1999), p. 359-364. ACM. <<https://doi.org/10.1145/311535.311589>>.
- De Vignemont, Frédérique. 2011. « Embodiment, ownership and disownership ». *Consciousness and cognition*, vol. 20, n° 1, p. 82-93.
- Wade, Nicholas J et Hiroshi Ono. 2012. « Early studies of binocular and stereoscopic vision1 ». *Japanese Psychological Research*, vol. 54, n° 1, p. 54-70.
- Wallbott, Harald G. 1998. « Bodily expression of emotion ». *European journal of social psychology*, vol. 28, n° 6, p. 879-896.
- Wiederhold, Brenda K, D P Jang, Mayumi Kaneda, Irene Cabral, Yair Lurie, T May, I Y Kim, Mark D Wiederhold et S I Kim. 2001. « An investigation into physiological responses in virtual environments: an objective measurement of presence ». *Towards cyberpsychology: Mind, cognitions and society in the internet age*.

- Witmer, B G et M J Singer. 1994. *Measuring immersion in virtual environments*. Tech. Rep. 1014, US Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Witmer, B G et M J Singer. 1998. « Measuring presence in virtual environments: a presence questionnaire ». *Presence*, vol. 7, n° 3, p. 225-240. <<https://doi.org/10.1162/105474698565686>>.
- Yang, Kai-Jie, Yan-Jun Chen, Kai-Wen Xu et Walter W Chen. 2015. « Application Of Google Cardboard In Fire Hazard Simulation ». In *The 36th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2015)*. (2015).
- Yoo, Soojeong et Callum Parker. 2015. « Controller-less Interaction Methods for Google Cardboard ». In *Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Spatial User Interaction*. (2015), p. 127. ACM.
- Zeng, Zhihong, M. Pantic, G.I. Roisman et T.S. Huang. 2009. « A Survey of Affect Recognition Methods: Audio, Visual, and Spontaneous Expressions ». *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 31, n° 1, p. 39-58. <<https://doi.org/10.1109/TPAMI.2008.52>>. Consulté le 29 août 2016.
- Zimmerman, Thomas G, Jaron Lanier, Chuck Blanchard, Steve Bryson et Young Harvill. 1987. « A hand gesture interface device ». In *ACM SIGCHI Bulletin*. (1987), p. 189-192. ACM.