

UQAC

Université du Québec
à Chicoutimi

Nouvelles approches pour une exploitation efficace des comportements et interactions de l'humain dans l'environnement virtuel

Par Sorelle Audrey Kamkuimo Kengne

Thèse présentée à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de Docteur (Ph. D.) en sciences et technologies de l'information

Québec, Canada

© Sorelle Audrey Kamkuimo Kengne, 2021

RÉSUMÉ

La création des moyens permettant à l'humain de se retrouver dans un endroit différent du monde réel n'est pas une nouveauté. Les outils comme les peintures ou les livres permettent tout autant de transporter l'humain par imagination dans un monde fictif afin de lui permettre de s'évader de la vie réelle. C'est également ce que permettent les technologies de la réalité virtuelle. Cependant, les environnements de la réalité virtuelle sont des représentations 3D numériques exploitables à l'échelle humaine. Ils peuvent stimuler au maximum les habiletés perceptives de l'humain à travers ses canaux sensoriels, tout en lui permettant d'influencer activement le déroulement des événements qui y ont lieu. De ce fait, ils représentent un atout majeur pour la représentation de l'information à des fins diverses.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'exploitation de la réalité virtuelle dans le cadre de la thérapie par exposition pour le traitement du trouble de stress post-traumatique. En faisant une revue de littérature dans ce domaine, nous avons constaté le rôle essentiellement passif qui est attribué au patient. En effet, les études antérieures se sont focalisées sur la composante « modélisation 3D » de la réalité virtuelle ainsi que sur la stimulation sensorielle, avec pour but principal d'aider le patient à narrer son trauma. Cela est fait au détriment d'une des caractéristiques principales de la réalité virtuelle qu'est l'interaction du sujet avec l'environnement virtuel. Ainsi, au vu des avantages qu'elles offrent, nous pensons que les technologies de la réalité virtuelle devraient être utilisées pour permettre au patient de revivre son trauma différemment au moyen de l'interaction.

Alors, nous avons proposé des approches basées sur le modèle de référence de la réalité virtuelle. Ces approches exploitent les techniques de gamification avancées des jeux sérieux ajoutées à la technique d'ajustement dynamique de la difficulté empruntée au domaine du jeu vidéo, pour implémenter les interactions naturelles de l'humain avec l'environnement virtuel. Nous avons appliqué ces approches à un simulateur de conduite de camion en réalité virtuelle pour traiter les camionneurs souffrant de trouble de stress post-traumatique. Les résultats d'évaluation d'utilisabilité du simulateur conformément à ces approches y sont présentés : le sentiment de présence a été atteint à travers cet outil et les participants ont trouvé la qualité des interactions avec l'environnement virtuel optimale. En perspectives, nous avons décrit l'application clinique expérimentale qui sera effectuée avec des patients en résidence à « La Futaie », centre de thérapie avec lequel nous avons collaboré tout au long de cette recherche.

Mots clés : Réalité virtuelle, Action, Interaction, Enaction, Trouble de stress post-traumatique, TSPT, Thérapie d'exposition par la réalité virtuelle, TERV, Apprentissage, Jeux sérieux, Ajustement dynamique de la difficulté, Retour physiologique.

ABSTRACT

Creating the means for humans to find themselves in a place different from the real world is nothing new. Tools such as paintings or books also allow humans to be transported by imagination into a fictitious world in order to escape from real life. This is also what virtual reality technologies allow. However, virtual reality environments are digital 3D environments usable on a human scale. They can maximize the perceptual skills of humans through their sensory channels while allowing them to actively influence the course of events that take place in these environments. Therefore, they are a major asset for the representation of information for various purposes.

In this thesis, we focused on the use of virtual reality as part of exposure therapy for the treatment of post-traumatic stress disorder. By reviewing the literature in that area, we noted the essentially passive role attributed to the patient. Indeed, previous studies have focused on the "3D modeling" component of virtual reality as well as on sensory stimulation, with the main goal of helping the patient to narrate his trauma. That is done to the detriment of one of the main characteristics of virtual reality, which is the subject's interaction with the virtual world. So, given the benefits they offer, we believe that virtual reality technologies should be used to allow the patient to relive his trauma differently through interaction.

So, we have proposed approaches based on the virtual reality reference model. These approaches exploit the advanced gamification techniques of serious games combined with the dynamic difficulty adjustment technique borrowed from the field of video games, to implement the natural interactions of humans with the virtual environment. We applied these approaches to a virtual reality truck driving simulator to treat truckers with post-traumatic stress disorder. The simulator usability evaluation results in accordance with these approaches are presented: the feeling of presence was achieved through this tool and the participants found the quality of interactions with the virtual world to be optimal. In perspective, we have described the experimental clinical application that will be carried out with patients in residence at "La Futaie", the therapy center with which we have collaborated throughout this research.

Keywords: Virtual reality, Action, Interaction, Enaction, Post-traumatic stress disorder, PTSD, Virtual reality exposure therapy, VRET, Learning, Serious games, Dynamic difficulty adjustment, Physiological feedback.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT.....	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	xii
LISTE DES ANNEXES	xiii
DÉDICACE	xiv
REMERCIEMENTS.....	xv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PARTIE 1 - DOMAINE DE RECHERCHE.....	5
CHAPITRE 1 - DÉFINITION, CARACTÉRISTIQUES ET POTENTIELS DES TECHNOLOGIES DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE	6
1.1 INTRODUCTION.....	6
1.2 DÉFINITIONS.....	7
1.3 L'INTERACTION AU CŒUR DE LA RV	9
1.3.1 TECHNIQUES D'INTERACTION	10
1.3.2 LES INTERFACES COMPORTEMENTALES	10
1.4 L'IMMERSION	12
1.5 LA PRÉSENCE	13
1.5.1 LES FACTEURS DÉTERMINANTS DE LA PRÉSENCE EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL.....	14
1.5.2 MESURES DE LA PRÉSENCE EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL ..	16
1.6 CONCLUSION	17
CHAPITRE 2 - LE TROUBLE DE STRESS POST-TRAUMATIQUE ET SES TRAITEMENTS.....	18
2.1 DONNÉES ÉPIDÉMIOLOGIQUES ET COÛTS AU CANADA	18
2.2 DESCRIPTION DU TSPT.....	19
2.2.1 DESCRIPTION DU TSPT SELON LA CINQUIÈME ÉDITION DU DSM-V 19	
2.2.2 DESCRIPTION DU TSPT SELON LES THÉORIES DE L'APPRENTISSAGE ET LA THÉORIE DU TRAITEMENT ÉMOTIONNEL ..	20
2.3 APPROCHES THÉRAPEUTIQUES POUR LE TSPT.....	23
2.3.1 LA THÉRAPIE PAR EXPOSITION	24
2.3.2 FORMES D'EXPOSITION.....	25

2.3.3	PROGRAMME D'EXPOSITION PROLONGÉE	26
2.3.4	THÉORIE DU TRAITEMENT ÉMOTIONNEL.....	27
2.3.5	PROTOCOLE GÉNÉRAL DU PROGRAMME D'EXPOSITION PROLONGÉE.....	27
2.4	CONCLUSION	28
CHAPITRE 3 - LA THÉRAPIE D'EXPOSITION PAR LA RÉALITÉ VIRTUELLE POUR LE TRAITEMENT DU TROUBLE DE STRESS POST- TRAUMATIQUE.....		29
3.1	BÉNÉFICES POTENTIELS DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE POUR LE TRAITEMENT DU TROUBLE DE STRESS POST-TRAUMATIQUE.....	29
3.2	ANALYSE DES OUTILS DE TERV POUR LE TSPT.....	31
3.2.1	SYSTÈME VIRTUAL VIETNAM	32
3.2.2	SYSTÈME VIRTUAL IRAQ/AFGHANISTAN OU BRAVEMIND DANS SA VERSION ACTUELLE	35
3.2.3	SYSTÈME BRAVEMIND-MST	44
3.2.4	SYSTÈME VIRTUAL WORLD TRADE CENTER (WTC).....	44
3.2.5	SYSTÈME POUR TRAITER LES VICTIMES DES GUERRES AFRICAINES	46
3.2.6	LE SYSTÈME BUSWORLD.....	47
3.2.7	SYSTÈME POUR TRAITER LES VICTIMES DES AGRESSIONS VIOLENTES	49
3.2.8	SYSTÈME POUR TRAITER LES VICTIMES D'ACCIDENTS DE VÉHICULES A MOTEUR	50
3.2.9	ÉTUDES COMPARANT LA TERV A D'AUTRES FORMES DE TRAITEMENT	54
3.3	DISCUSSION DE LA LITTÉRATURE ET POSITIONNEMENT DE NOS TRAVAUX.....	66
3.3.1	ON N'OBSERVE PAS UNE SUPÉRIORITÉ DES APPROCHES DE TRAITEMENTS BASÉES SUR LA RV	66
3.3.2	ON OBSERVE PLUSIEURS CAS D'ABANDON DANS LES ÉTUDES EXPLOITANT LA RV	67
3.3.3	LES PATIENTS NE SEMBLENT PAS ÊTRE PLEINEMENT SATISFAITS DES OUTILS DE TRAITEMENT PAR LA RV	68
3.3.4	LES USAGERS DEMANDENT DES AMÉLIORATIONS DU RÉALISME	68
3.3.5	LES USAGERS SOUHAITENT AVOIR PLUS DE POSSIBILITÉS D'INTERACTION	69
3.3.6	ON OBSERVE UNE DIFFICULTÉ DE RECRUTEMENT	70
3.4	CONCLUSION.....	70
PARTIE 2 - PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE.....		72
CHAPITRE 4 - PROBLÉMATIQUE.....		73

CHAPITRE 5 - APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	75
5.1 INTRODUCTION.....	75
5.2 ENVISAGER LA THÉRAPIE TERV COMME UN JEU SÉRIEUR	75
5.3 ADAPTER LA TERV AU PROFIL DE CHAQUE PATIENT : L'AJUSTEMENT DYNAMIQUE DE LA DIFFICULTÉ.....	76
5.4 PARAMÈTRE D'AJUSTEMENT À CONSIDÉRER.....	77
5.5 ÉTAPE DE NOTRE MÉTHODOLOGIE.....	78
CHAPITRE 6 - THÉRAPIE D'EXPOSITION CENTRÉE SUR L'ACTION (ACET).....	80
6.1 INTRODUCTION.....	80
6.2 ÉVOLUTION DES THÉORIES DE L'APPRENTISSAGE.....	81
6.3 THÉRAPIE D'EXPOSITION CENTRÉE SUR L'ACTION (ACET POUR <i>ACTION-CENTRERED EXPOSURE THERAPY</i>).....	83
6.3.1 PRINCIPE DE L'ACET	83
6.3.2 LES PHASES DE L'ACET	84
6.3.3 CHOIX DES ACTIONS À INCLURE DANS LA THÉRAPIE	86
6.3.4 POINTS D'IMPACT DE L'ACET.....	87
6.4 CAS EMPIRIQUE	89
6.4.1 GAMIFICATION ET PERSONNALISATION DU SIMULATEUR DE CONDUITE DE CAMION	89
6.4.2 MATÉRIELS	90
6.4.3 PROCESSUS THÉRAPEUTIQUE	90
6.4.4 DISCUSSION.....	93
6.5 CONCLUSION	93
CHAPITRE 7 - APPROCHE ÉNACTIVE DE TRAITEMENT.....	95
7.1 INTRODUCTION.....	95
7.2 ÉNACTION, APPRENTISSAGE, TSTP ET TERV.....	96
7.2.1 ÉNACTION ET TSTP.....	97
7.2.2 ÉNACTION ET APPRENTISSAGE	98
7.2.3 ÉNACTION ET TERV.....	99
7.3 MISE EN ÉVIDENCE DE LA COMPLÉMENTARITÉ DU SUJET ET DE L'ENVIRONNEMENT	99
7.4 LA NOTION DE SITUATION AU CENTRE DE TOUT PROCESSUS THÉRAPEUTIQUE.....	100
7.5 DÉVELOPPEMENT DE LA TERV SUIVANT LA PERSPECTIVE DE L'ÉNACTION	101
7.5.1 RAPPEL SOMMAIRE DES PROCÉDURES DE TERV ACTUELLES POUR LE TSPT.....	102

7.5.2	ILLUSTRATION DE L'APPROCHE DE THÉRAPIE BASÉE SUR L'ÉNACTION	103
7.6	CONCLUSION	105
CHAPITRE 8 - RAPPORT GÉNÉRAL SUR LA NOUVELLE CONCEPTION ET LE DÉVELOPPEMENT DU SIMULATEUR DE CONDUITE DE CAMION ...		107
8.1	INTRODUCTION.....	107
8.2	DÉMARCHE DE CONCEPTION.....	108
8.2.1	LES IMMERSION-INTERACTION FONCTIONNELLES	108
8.2.2	LES IMMERSION-INTERACTION COGNITIVES	110
8.2.3	LES IMMERSION-INTERACTION SENSORI-MOTRICES	113
8.3	INTERFACES COMPORTEMENTALES UTILISÉES.....	113
8.3.1	LE CASQUE <i>OCULUS RIFT</i> POUR L'EXPLORATION VISUELLE	113
8.3.2	LE LOGITECH G27 POUR LA CONDUITE NATURELLE DU CAMION VIRTUEL ET POUR LES ACTIONS MÉTAPHORIQUES	114
8.3.3	L'HEXOSKIN POUR COMMUNIQUER LE RYTHME CARDIAQUE DE L'UTILISATEUR AU SIMULATEUR	116
8.3.4	UN ORDINATEUR DE BUREAU POUR L'EXPLOITATION DE CES INTERFACES	117
8.4	PRINCIPALES MÉCANIQUES	117
8.5	ENVIRONNEMENTS VIRTUELS ET SCÉNARIOS	118
8.5.1	ENVIRONNEMENT D'INITIATION.....	118
8.5.2	ENVIRONNEMENTS DE CONDUITE OUVERTE	119
8.6	CONCLUSION	121
CHAPITRE 9 - MODULE D'AJUSTEMENT DYNAMIQUE DE LA DIFFICULTÉ EN FONCTION DU <i>FEEDBACK</i> PHYSIOLOGIQUE RÉCUPÉRÉ EN TEMPS RÉEL		122
9.1	INTRODUCTION.....	122
9.2	TRAVAUX RELATIFS A L'AJUSTEMENT DYNAMIQUE DE LA DIFFICULTÉ.....	124
9.3	DÉVELOPPEMENT DU MODULE D'AJUSTEMENT DYNAMIQUE DE LA DIFFICULTÉ	126
9.4	CATÉGORISATION DES NIVEAUX D'ANXIÉTÉ	129
9.5	ALGORITHME D'ADD	130
9.6	CONCLUSION	133
PARTIE 3 - ÉVALUATION, RÉSULTATS ET PERSPECTIVES.....		134
CHAPITRE 10 - ÉVALUATION ET RÉSULTATS.....		135
10.1	ÉVALUATION	135
10.1.1	CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUE	135
10.1.2	APPROCHES D'ÉVALUATION	135

10.1.3	RECRUTEMENT	139
10.1.4	LIEU D'ÉVALUATION ET PERSONNES PRÉSENTES	139
10.1.5	INSTRUMENTS DE MESURE	139
10.1.6	DÉROULEMENT D'UNE SÉANCE D'ÉVALUATION	141
10.2	RÉSULTATS	143
10.3	DISCUSSION.....	149
10.3.1	PRÉSENTATION D'UNE ÉTUDE SIMILAIRE EFFECTUANT L'ÉVALUATION D'UN SIMULATEUR DE CONDUITE	149
10.3.2	CONFRONTATION DE L'ÉTUDE PRÉCÉDENTE À LA NÔTRE ...	150
10.3.3	LIMITES.....	151
10.4	CONCLUSION	152
CHAPITRE 11 - PERSPECTIVES À COURT TERME.....		153
11.1	INTRODUCTION	153
11.2	RECRUTEMENT.....	153
11.3	PRINCIPE D'ÉVALUATION	154
11.3.1	LIEU D'ÉVALUATION ET PERSONNES PRÉSENTES.	154
11.3.2	HYPOTHÈSES	154
11.3.3	DEVIS DE RECHERCHE.....	155
11.3.4	INSTRUMENTS DE MESURES AUTO-RAPPORTÉES	156
11.4	FRÉQUENCE DE PASSATION DES MESURES	157
11.5	STRATÉGIES D'ANALYSES	158
11.6	RÉSULTATS ATTENDUS	158
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		159
ANNEXES.....		164
RÉFÉRENCES		183

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : RÉSUMÉ DES OUTILS DE RV EXISTANT POUR LE TRAITEMENT DU TSPT	65
TABLEAU 2 : APPROCHES D'ÉVALUATION DES APPLICATIONS DE RV	136
TABLEAU 3 : RÉSULTATS D'ÉVALUATION D'UTILISABILITÉ	145

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : NOTRE REPRÉSENTATION DU RÉSEAU DE PEUR ASSOCIÉ AU TSPT.....	22
FIGURE 2 : PRINCIPE DES JEUX SÉRIEUX	76
FIGURE 3 : LES PHASES DE L'ACET.....	86
FIGURE 4 : SCHÉMATISATION DES SYSTÈMES DE TERV ACTUELS.....	103
FIGURE 5 : SCHÉMATISATION DE LA TERV SUIVANT LE MODÈLE DE L'ÉNACTION.....	103
FIGURE 6 : CASQUE DE RÉALITE VIRTUELLE OCULUS RIFT.....	114
FIGURE 7 : LOGITECH STEERING WHEEL G27	115
FIGURE 8 : HEXOSKIN	116
FIGURE 9 : LABORATOIRE DE DÉVELOPPEMENT DU SIMULATEUR	117
FIGURE 10 : SCÉNARIO DE TAPIS VOLANT	119
FIGURE 11 : VUE DE DESSUS DES PRINCIPAUX ENVIRONNEMENTS.....	119
FIGURE 12 : QUELQUES CAPTURES DE LA VUE DURANT LA CONDUITE.....	121
FIGURE 13 : MENU FACILE D'UTILISATION POUR LE THÉRAPEUTE	128
FIGURE 14 : EXEMPLE D'ACCIDENT	128
FIGURE 15 : ALGORITHME D'ADD ET DIAGRAMME D'ÉTAT ASSOCIÉ.....	132
FIGURE 16 : UN PARTICIPANT À L'ÉVALUATION.....	141
FIGURE 17 : UN AUTRE PARTICIPANT À L'ÉVALUATION.....	143
FIGURE 18 : DISTRIBUTION DES SCORES POUR CHAQUE HEURISTIQUE.	148

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

UQAC	Université du Québec à Chicoutimi
RV	Réalité Virtuelle
TSPT	Trouble de Stress Post-Traumatique
TERV	Thérapie d'Exposition par la Réalité Virtuelle
ACET	Action-Centered Exposure Therapy
ADD	Ajustement Dynamique de la Difficulté
AHA	American Heart Association
APA	American Psychological Association
OQLF	Office Québécois de la Langue Française
ISPR	International Society for Presence Research
US-DOT	U.S. Department of Transportation
DSM	Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders
EV	Environnement Virtuel
HMD	Head-Mounted Display
RC	Rythme Cardiaque
SG	Serious Game
WTC	World Trade Center
EMDR	Eye Movement Desensitization & Reprocessing

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : APPROBATION ÉTHIQUE.....	164
ANNEXE 2 : FEUILLE DE PROFIL POUR LE TEST D'UTILISABILITÉ.....	167
ANNEXE 3 : QUESTIONNAIRE DE PRÉSENCE SIMPLIFIÉ.....	168
ANNEXE 4 : QUESTIONNAIRE D'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE L'OUTIL ET DES INTERACTIONS	169
ANNEXE 5 : QUESTIONNAIRE D'ÉVALUATION GLOBALE DE L'OUTIL POUR LES UTILISATEURS FINAUX	170
ANNEXE 6 : FORMULAIRE DE CONSENTEMENT.....	171
ANNEXE 7 : TRADUCTION FRANÇAISE DU PCL-5.....	177
ANNEXE 8 : FEUILLE DE PROFIL POUR LES UTILISATEURS FINAUX	179
ANNEXE 9 : QUESTIONNAIRE D'APPRÉCIATION.....	180
ANNEXE 10 : QUESTIONNAIRE SUR LES ÉVÈNEMENTS DE VIE.....	181
ANNEXE 11 : QUESTIONNAIRE ANTHROPOMÉTRIQUE.....	182

DÉDICACE

À mes enfants, **Emmanuella Divine, Lysandra Gray et Evan Menadel.**

Vous êtes ma source de motivation.

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu être accompli s'il n'était encadré par le regard de l'être suprême par qui je puis tout, le Dieu tout puissant.

Je viens par les lignes suivantes exprimer ma gratitude envers tous ceux qui m'ont soutenu et accompagné tout au long de ce doctorat. Mes sincères remerciements vont particulièrement :

Au Professeur Bob-Antoine J Menelas, mon directeur de recherche : je vous dis grandement merci de m'avoir fait confiance depuis le début en m'acceptant dans votre équipe de recherche. Vous avez été un bon guide et un excellent conseiller pour moi durant cette recherche.

Au Docteur Girard, président du centre de thérapie « La Futaie » : merci beaucoup pour votre collaboration, votre orientation et votre expertise thérapeutique durant cette recherche.

À la Professeure Linda Paquette, du département des sciences de la santé de l'Université du Québec à Chicoutimi. Merci pour votre contribution à la planification des futures applications cliniques pour cette recherche.

Aux membres du jury d'évaluation, le Professeur Bruno Bouchard de l'Université du Québec à Chicoutimi, le Professeur Frédéric Banville de l'Université du Québec à Rimouski, et le Professeur Mehdi Ammi de l'université Paris 8 : je vous remercie d'avoir accepté d'évaluer mes travaux depuis mon projet de thèse. Vos remarques et suggestions m'ont permis de bonifier amplement mon travail.

À Mathilde Fossaert et Sébastien Tremblay, avec qui j'ai eu à travailler en début de doctorat : merci pour votre contribution à l'analyse initiale du domaine dans lequel s'est inscrite cette thèse.

Au Professeur Marcel Fouda, mon encadreur de l'École Normale Supérieure du Cameroun : vous avez été mon enseignant et mon mentor depuis ma première année d'informatique jusqu'à la maîtrise et votre soutien vis-à-vis de ma personne a continué sur cette voie de la recherche. Je vous dis grandement merci de m'avoir transmis cette passion pour l'informatique et de m'avoir appris à l'entretenir.

Au Professeur René Ndoundam, mon encadreur à la maîtrise à l'Université de Yaoundé 1 : merci Professeur, de m'avoir initié à la recherche et de m'avoir encouragé à poursuivre dans cette voie.

À Monsieur Christian Yves Fongang, directeur général de l'entreprise SDK Games Africa : je vous remercie de m'avoir initié à la réalité virtuelle et de m'avoir apporté votre soutien durant cette thèse.

À mes parents, Madame et Monsieur Kamkuimo : même si les mots que je vais écrire ici ne suffiront jamais pour exprimer ma gratitude envers vous qui m'avez mis au

monde et qui avez fait de moi ce que je suis aujourd'hui, je tiens quand même à vous dire un grand merci papa et maman.

À mes frères et sœurs, Linda, Mireille, Raphael, Kévine, Donald et Franck : vous m'avez toujours encouragé dans mes choix de vie. Merci les Kamkuimo.

À ma belle-mère, Madame Tatnke Léocadie : merci maman pour ton amour et tes encouragements exceptionnels durant cette thèse.

À mon conjoint le Docteur Huvelin Tetto : Chéri, c'est grâce à ton inestimable participation que j'ai pu accomplir ce travail. Ta présence physique comme virtuelle, ton soutien et ton écoute ont été les ingrédients essentiels pour cet accomplissement. Avec nos filles Emmanuella et Lysandra, vous avez été d'une si grande compréhension et vos encouragements m'ont permis de faire fi de la distance qui nous a séparé durant cette thèse. Je ne saurais clore ce paragraphe sans adresser mille mercis à ma petite sœur Kévine Kamkuimo et ma sœur de cœur Mardel Nyangwa, qui ont su prendre le relais et s'occuper de ma famille pendant mon absence durant ces années de doctorat.

À tous mes amis, plus spécialement Judith Harvey, Denis Parise et Mona-Liz Pelletier : je vous adresse ma profonde gratitude et ma reconnaissance parce que vous m'avez accueilli comme en famille et m'avez encouragé de très près pendant cette thèse.

À tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail : je vous dis Merci.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis les premiers ordinateurs, l'évolution technologique tend à améliorer la communication entre l'humain et le virtuel. Plusieurs dispositifs se sont orientés vers des technologies qui mettent l'accent sur l'interaction pseudo-naturelle du sujet avec l'environnement virtuel. C'est le cas des technologies de la Réalité Virtuelle (RV). Même si elles existent depuis les années 50, ce n'est que récemment qu'elles ont commencé à présenter un attrait particulier aux yeux du grand public. Pour la multitude, la RV semble être majoritairement associée à des dispositifs matériels tels que des casques immersifs capables de plonger l'utilisateur dans des Environnements Virtuels (EV) conçus à l'échelle humaine (Biocca & Levy, 2013). Certains vont jusqu'à restreindre la RV à des environnements culturels où sont mis en place de tels dispositifs (par exemple la cyber fiction) (Biocca & Levy, 2013). Cependant, la RV envisage d'exploiter au mieux les capacités sensori-motrices et proprioceptives de l'utilisateur pour lui permettre une activité qui se rapprocherait plus du naturel dans un environnement 3D numériquement conçu (Fuchs, Moreau, Berthoz, & Vercher, 2006). Cette activité tient compte de différents processus cognitifs du sujet et n'est possible qu'au moyen de dispositifs spécifiques appelés interfaces comportementales. Le but d'un tel interfaçage est de favoriser au mieux les schèmes comportementaux naturels de l'homme dans l'EV. Étant donné les multiples possibilités qu'elles offrent, dont la capacité à permettre la création, l'exploration et la manipulation active des environnements virtuels à l'échelle humaine, les technologies de la RV sont exploitées dans plusieurs secteurs d'activité dont les transports, l'exploration des données, la culture, la médecine, la psychothérapie, etc.

Indépendamment du domaine d'exploitation, l'Homme est au centre de tout système de RV; même si un système doit avoir des fonctionnalités précises et être utilisé à l'aide d'outils technologiques adaptés, il reste conçu pour l'Homme. Ceci est d'autant plus important à considérer, car « dans un environnement virtuel interactif, la personne exploite la même démarche que dans un monde réel, pour organiser le virtuel selon un ensemble de règles spatiotemporelles et causales » (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006). Ainsi, les systèmes de RV visent non seulement à immerger adéquatement le sujet dans l'EV (Immersion), mais aussi à exploiter ses comportements naturels pour améliorer la qualité de ses interactions (Interaction). Ce postulat implique des approches de conception conjointement axées sur trois niveaux d'Immersion et d'Interaction (Immersion-Interaction) : les Immersion-Interaction sensori-motrices qui prônent une orientation de la conception vers les actions motrices du sujet dans l'EV et les retours sensoriels de l'environnement, les Immersion-Interaction cognitives qui orientent la réflexion vers la prise en compte des habiletés cognitives de l'utilisateur final, et les Immersion-Interaction fonctionnelles qui visent la prise en compte des fonctionnalités interactives du système (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006).

La considération de ces trois niveaux d'Immersion-Interaction pousse à s'interroger sur la réalité perceptive de l'utilisateur dans l'EV et à chercher à comprendre comment il s'approprié ledit environnement. En effet dans le monde réel, l'homme est en évolution permanente avec son environnement. Cette évolution se fait dans une dynamique de perception, d'actions et d'interactions qui lui permettent de modifier l'environnement, et en retour de s'adapter aux changements continus et infinis de cet environnement. Ainsi, autant que l'Homme modifie l'environnement, l'environnement influe sur lui. De ce fait, la réalité de l'Homme se résume à cette boucle perpétuelle

d'évolution conjointe avec l'environnement. C'est pourquoi, lors de la conception d'un outil de RV, outre les fonctionnalités de l'application de RV qui constituent généralement les questions primaires, il serait nécessaire de se poser la question suivante: Quels sont les paramètres à considérer de près pour avoir un système de RV qui embrasse au mieux les trois niveaux d'immersion et d'interaction précédemment cités pour favoriser une évolution conjointe des deux entités que sont l'utilisateur et l'EV?

Pour répondre à cette question, nous considérons l'importance de l'action et la théorie de l'énaction pour proposer de nouvelles approches d'exploitation des technologies de la RV. Nous développons cela dans le domaine de la psychothérapie, plus précisément du traitement du Trouble de Stress Post-Traumatique (TSPT) à l'aide de la RV. Cette thèse est structurée en trois grandes parties :

- 1) Dans la première partie, nous présentons le domaine de recherche de cette thèse. Nous nous focalisons sur la description des technologies de la RV en faisant ressortir les éléments qui constituent son essence. Ensuite, nous décrivons le TSPT et les méthodes de traitements, dont la Thérapie d'Exposition par la Réalité Virtuelle (TERV). Nous poursuivons avec l'analyse des travaux portant sur la TERV pour le TSPT. À la suite de cette analyse, nous faisons une discussion dans laquelle nous levons plusieurs manquements liés au mode d'exploitation de la RV.
- 2) Dans la deuxième partie, nous partons de la discussion de la revue de la littérature pour formuler notre problématique de recherche. Nous présentons ensuite la méthodologie que nous avons adoptée. Cette méthodologie commence par la description des nouvelles approches théoriques que nous avons proposées dans cette thèse. La première est une approche de thérapie

d'exposition centrée sur l'action. La deuxième est une extension de la précédente à une vision éactive prônant la transformation dynamique du sujet et de l'environnement durant le processus thérapeutique. Nous poursuivons en décrivant l'implémentation de telles approches dans un simulateur de conduite de camion.

- 3) Dans la troisième partie de cette thèse, nous présentons les résultats des tests d'utilisabilité du simulateur développé. Nous clôturons avec la présentation, en perspective, des applications cliniques qui seront effectuées au centre de thérapie « La Futaie ».

PARTIE 1

DOMAINE DE RECHERCHE

Résumé : Dans cette première partie de la thèse, nous décrivons notre domaine de recherche. En premier chapitre, nous présentons les technologies de la réalité virtuelle en insistant sur leurs principales caractéristiques. Au deuxième chapitre, nous analysons le trouble de stress post-traumatique. Cette analyse nous permet de voir l'impact négatif qu'il peut avoir et de justifier pourquoi il est important de s'y intéresser. Nous présentons également dans ce même chapitre les différentes formes de traitements de cette maladie, ainsi que les limites de chacune. Cela nous conduit à la description de la thérapie d'exposition par la réalité virtuelle qui annonce des issues prometteuses pour cette maladie. Dans le troisième chapitre de cette partie, nous présentons comment les technologies de la réalité virtuelle sont actuellement exploitées dans le traitement du trouble de stress post-traumatique. Plus particulièrement, nous passons en revue les différents outils de réalité virtuelle qui ont été développés à ce jour pour y faire face. Nous analysons ensuite des traitements effectués avec ces outils. Nous finissons par une discussion générale de cette revue de la littérature.

CHAPITRE 1

DÉFINITION, CARACTÉRISTIQUES ET POTENTIELS DES TECHNOLOGIES DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE

Résumé : Ce chapitre porte sur la description des technologies de la réalité virtuelle. Le but est de faire ressortir les éléments clés qui les caractérisent et qui ont constitué la fondation pour cette thèse.

1.1 INTRODUCTION

Contrairement aux différentes technologies permettant à l'humain d'interagir avec le numérique (comme les ordinateurs standards par exemple), la Réalité Virtuelle (RV) vise une interaction naturelle de l'humain avec des environnements 3D à grandeur réelle qui sont soit purement fictifs, symboliques, ou une copie du réel (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006). Pour ce faire, la RV puise ses sources dans plusieurs autres domaines desquels elle emprunte certaines caractéristiques clés pour créer chez l'utilisateur le sentiment de participation dans un espace synthétique. Par exemple, elle exploite le cadre des techniques de l'information et de la communication notamment au niveau des algorithmes et des modèles numériques pour la création d'Environnements Virtuels (EV) interactifs. Ajouté à cela, le secteur des sciences humaines et des sciences du vivant concourt à la compréhension de l'humain dans son environnement afin de centrer les approches de la RV sur l'utilisateur final. On peut également souligner l'importance des sciences de l'ingénieur qui interviennent notamment au niveau de la mise en place de dispositifs sensori-moteurs adaptés aux interactions entre l'utilisateur et le système de RV.

Même si les technologies de la RV existent depuis le milieu de 20^e siècle, l'expression « réalité virtuelle » a été introduite pour la première fois vers le milieu des années 80 par Jaron Lanier (1988). Depuis lors, plusieurs définitions ont été proposées. Nous allons ici analyser quelques-unes d'entre elles afin de ressortir les caractéristiques principales de la RV.

1.2 DÉFINITIONS

Lanier (1988) considère la RV comme une technologie utilisant des dispositifs informatisés pour percevoir, à l'aide des organes sensoriels (qui vont au-delà des sens communément cités), un autre monde différent du monde physique. Cette définition met en avant l'une des idées maîtresses de la RV qu'est la perception d'un autre monde. Cependant, comme souligné dans le chapitre 17 du premier volume du traité de la réalité virtuelle (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006), la perception est active. En ce sens, elle n'implique pas que les organes sensoriels, mais nécessite une activité motrice du sujet. La définition proposée par le dictionnaire Merriam Webster's (1987) semble souligner le paramètre d'action tout aussi capital pour décrire la RV. Pour ce dictionnaire, la réalité virtuelle est: « *an artificial environment which is experienced through sensory stimuli (such as sights and sounds) provided by a computer and in which one's actions partially determine what happens in the environment* ». Cette définition souligne l'importance de l'action du sujet et de ses conséquences sur cet environnement. Elle peut être renchérie par celle de Gigante qui souligne la participation plutôt que la simple observation du sujet dans l'environnement (Gigante, 1993). D'autres auteurs comme Zheng, Chan et Gibson (1998) proposent des définitions qui insistent sur le réalisme de l'EV. Pour ces derniers, la RV est: « *an advanced, human-computer interface that simulates a realistic*

environment. The participants can move around in the virtual world » (Zheng et al., 1998). Dans la suite de leurs travaux, ils soulignent l'immersion et l'interactivité comme idées clés de la RV. Dans le même ordre d'idées, Burdea et Coiffet (2003) insistent également sur l'importance d'un environnement visuellement réaliste créé à l'aide de l'infographie : « *Virtual reality is a simulation in which computer graphics is used to create a realistic-looking world.* ». Ils complètent ce positionnement en précisant que l'environnement synthétique créé n'est pas statique, mais répond aux *entrées* de l'utilisateur. Ils définissent enfin la RV comme: « *[...] a high-end user-computer interface that involves real time simulation and interactions through multiple sensorial channels: these sensorial modalities are visual, auditory, tactile, smell and taste* » (Burdea & Coiffet, 2003). Sherman et Craig (2018) quant à eux mettent en avant le côté centré-humain de la RV en accentuant à la fois l'importance de l'interaction, de la boucle action-rétroaction, ainsi que de l'immersion et la présence du sujet dans la simulation. Ils définissent la RV comme:

« a medium composed of interactive computer simulations that sense the participant's position and actions and replace or augment feedback to one or more senses, giving the feeling of being mentally immersed or present in the simulation (a virtual world) » (Sherman & Craig, 2018).

À la lumière de ces définitions, nous pouvons noter avec Ellis (1994) que le but de la RV est de donner à l'utilisateur l'illusion d'un déplacement vers un autre emplacement, avec tous les enjeux que ce déplacement peut impliquer. Alors :

*« la réalité virtuelle va lui permettre de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de **temps**, de **lieu** et(ou) de type d'**interaction** : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique. »* (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006).

Cette extraction vers une réalité artificielle ne pourra être possible que si les dispositifs technologiques sont capables de créer chez l'utilisateur le sentiment d'être enveloppé par ce nouvel environnement (immersion) au point d'atteindre l'état psychologique d'y être

là (présence). Cela est lié à la fois à la qualité des stimuli sensoriels que l'utilisateur reçoit de cet environnement et à des modes d'interactions qui lui sont proposés. Finalement, une définition de la RV qui nous semble complète est la suivante :

« La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. » (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006).

Cette définition peut se résumer en trois principaux mots-clés qui caractérisent la RV : l'**interaction** en temps réel, l'**immersion** pseudo naturelle du sujet et son sentiment de **présence** dans l'environnement virtuel.

1.3 L'INTERACTION AU CŒUR DE LA RV

Les technologies de la RV offrent une tout autre façon d'appréhender le monde numérique. Elles ne limitent pas l'utilisateur à des environnements explorables via un simple écran d'ordinateur, un clavier et une souris standard. Elles poussent le bouchon plus loin en donnant à celui-ci la possibilité de faire activement partie de l'histoire qui se déroule dans le monde virtuel (Burdea & Coiffet, 2003). La relation entre l'utilisateur et l'EV est marquée par des interactions sans fin qui créent l'expérience de l'utilisateur. Pour Stuer (1992), l'interaction se définit comme « *the extent to which users can participate in modifying the form and content of a mediated environment in real time* ». Rubio-Tamayo et al. (2017) considèrent l'interaction comme « *the potential to receive information from the ensemble of our senses and to construct and configure an alternate reality or to simulate the reality* ». Dans chacune de ces définitions, on note l'importance de la participation active de l'utilisateur à la construction et la modification d'une réalité dans une dynamique échangiste entre le sujet et son environnement.

1.3.1 TECHNIQUES D'INTERACTION

Craig, Sherman et Will (2009) ont distingué trois principales primitives d'interactions entre l'humain et le système :

- La sélection qui consiste à faire un choix dans l'EV (exemple : choisir un objet sur lequel on doit agir, choisir une direction à prendre) ;
- La manipulation qui consiste à effectuer des actions sur l'objet sélectionné (exemple : déplacer l'objet) ;
- La navigation qui consiste pour l'utilisateur à se déplacer d'une place à l'autre dans l'EV.

La mise en œuvre de ces primitives en EV se fait au moyen d'interfaces comportementales.

1.3.2 LES INTERFACES COMPORTEMENTALES

Les interfaces comportementales ont pour rôle d'effectuer la liaison entre le système et le sujet (Fuchs, Moreau, Burkhardt, & Coquillart, 2006). Ils permettent notamment de simuler les comportements naturels de l'opérateur humain dans l'EV. Dans le jargon de la RV, les interfaces comportementales peuvent être classées en trois grandes catégories :

- 1) Les interfaces motrices par lesquels le sujet effectue des actions pour modifier l'EV.
- 2) Les interfaces sensorielles permettant à L'EV de renvoyer au sujet des informations sensorielles correspondant aux retours cohérents et en temps réel de ces actions.

- 3) Les interfaces sensori-motrices pouvant englober à la fois les interfaces de perception sensorielle, de proprioception, et les interfaces d'action de l'utilisateur. Cela part de l'idée selon laquelle l'humain perçoit son environnement à travers de ses canaux sensoriels, et l'explore à travers son activité.

Le but d'une interface de RV est de permettre à l'utilisateur d'interagir avec un EV. Pour que cette interaction soit efficace, l'interface doit avoir un certain nombre de caractéristiques toutes apparentées à celles des interfaces Homme-machine standards. Ainsi, selon quelques critères ergonomiques définis par Bastien et Scapin (1993) :

- L'interface doit être un guidage pour l'utilisateur afin de faciliter l'utilisation du système, les interactions et lui permettre de connaître les actions à effectuer et leurs conséquences sur l'EV.
- La charge de travail reliée à l'interface doit correspondre aux habiletés cognitives et motrices de l'utilisateur afin de rendre les interactions plus rapides. En ce sens, dans le cadre de la RV, il serait primordial que les actions proviennent des schèmes comportementaux habituels de l'utilisateur ou de métaphores simplistes et explicites.
- Le contrôle de l'interface doit être explicite, permettant ainsi la transparence et la fluidité entre les actions de l'utilisateur et les réponses du système.
- Le système doit être adaptable en proposant des variétés de commandes en fonction de l'expérience de l'utilisateur.

Ces critères embrassent ceux de l'ergonomie applicable aux environnements virtuels (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006):

- L'utilité qui renvoie à la valeur pratique, l'avantage ou l'agrément significatif qu'apportent les fonctionnalités à l'utilisateur. Elle se mesure par l'efficacité, le gain en termes de coût, de vitesse, de précision.
- L'utilisabilité qui renvoie à la mesure de la performance des utilisateurs sur plusieurs points, dont la facilité d'apprentissage, la facilité de mémorisation et l'utilisation sans erreurs.
- L'accessibilité est le degré selon lequel un produit peut être utilisé par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié.
- La non-dangerosité de l'utilisation des dispositifs.
- La satisfaction des utilisateurs sur le plan de la pensée, des sensations et des émotions.
- L'acceptabilité qui concerne les attitudes et opinions des utilisateurs vis-à-vis des autres caractéristiques.

L'intérêt de la prise en compte de toutes ces caractéristiques est de maximiser l'immersion du sujet et de lui permettre d'expérimenter le sentiment de présence dans l'EV. Nous décrivons ces deux concepts dans la suite.

1.4 L'IMMERSION

La notion d'immersion est étroitement liée aux dispositifs technologiques utilisés pour plonger l'utilisateur dans l'EV (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006). De tels dispositifs agissent non seulement sur une ou plusieurs modalités sensorielles, mais proposent aussi des moyens d'interaction adéquats en vue d'isoler le monde extérieur. Dans le même sens, Jerald (2015), avec Slater (2002) et Wilbur (1997) associent

l'immersion à la capacité de l'application à projeter sur les récepteurs sensoriels de l'opérateur humain, une illusion de réalité à la fois inclusive, extensive, correspondante, encadrée et interactive. Dans cette caractérisation, l'inclusivité fait référence à l'exclusion de la réalité physique ; l'extensivité indique l'étendue des modalités sensorielles présentées à l'utilisateur ; la correspondance indique l'adéquation dans la présentation de ces modalités ; l'encadrement indique le champ de présentation des stimuli ; et l'interactivité fait référence à la possibilité pour l'utilisateur de modifier l'EV par ses actions, tout en recevant des retours sensoriels de l'environnement.

En somme, l'immersion du sujet peut être vue comme le résultat de l'assemblage de deux éléments fondamentaux : la stimulation sensorielle et l'interaction (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006). Elle a le potentiel d'engager l'utilisateur dans l'expérience en l'amenant à percevoir et interpréter les stimuli présentés (Jerald, 2015). Cependant, même si l'immersion est capable d'orienter l'esprit de l'utilisateur (Jerald, 2015) en l'enveloppant, en l'incluant et en lui permettant une interaction avec un environnement qui fournit un flot continu de stimuli (Witmer & Singer, 1998), il ne peut pas contrôler cet esprit. Ce point est attribué à la présence : « *How the user subjectively experiences the immersion is known as presence* » (Witmer & Singer, 1998).

1.5 LA PRÉSENCE

L'expérience globale vécue par l'utilisateur immergé dans un EV dépend aussi du degré de présence ressenti par ce dernier dans l'environnement. La présence peut être vue comme le résultat subjectif de l'immersion du sujet dans l'EV (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006). Il s'agit de la sensation « d'être là » dans l'EV, bien qu'étant physiquement

dans le monde réel. D'après la société internationale pour la recherche en présence, on a la définition suivante :

Presence (a shortened version of the term "telepresence") 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 (ISPR, 2000).

Cette définition est assez large et englobe également la sensation « d'être là » qu'un utilisateur d'autres technologies (comme la peinture ou le roman) peut avoir. Lorsqu'on rentre dans le domaine de la RV, la présence se définit tant en termes de stimuli sensorimoteurs cohérents rajoutés dans l'EV qu'en termes de conscience de la situation traduite en processus cognitifs du sujet, qui le poussent à prendre des décisions, à se comporter et à agir naturellement comme il le ferait dans le monde réel (Lessiter, Freeman, Keogh, & Davidoff, 2001; Slater, 1999; Witmer & Singer, 1998).

1.5.1 LES FACTEURS DÉTERMINANTS DE LA PRÉSENCE EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

À travers leurs recherches, Witmer et Singer (1998) ont conceptualisé les facteurs qui favoriseraient la présence en EV et les ont catégorisés en quatre groupes: les facteurs de contrôle, les facteurs sensoriels, les facteurs de distraction et les facteurs de réalisme. Les facteurs de contrôle concernent le degré et l'immédiateté du contrôle, ainsi que l'anticipation des événements et la modifiabilité de l'environnement physique. Les facteurs sensoriels permettent de définir les différentes modalités sensorielles utilisées, la richesse environnementale, la présentation et la cohérence multimodale et le degré de perception du mouvement. Les facteurs de distraction sont liés au degré d'isolation, d'attention sélective et de connaissance de l'interface. Les facteurs de réalismes décrivent

la cohérence des informations avec le monde objectif ainsi que la pertinence de l'expérience globale de l'utilisateur.

Cette catégorisation rejoint celle de Sheridan (1992) qui propose trois principaux déterminants de la présence en RV qui sont : l'étendue de l'information sensorielle (c'est-à-dire le nombre de modalités sensorielles utilisées), le niveau de contrôle du sujet sur l'environnement et la possibilité que le sujet a de modifier l'environnement. L'ensemble de toutes ces variables qui déterminent la présence en EV se rassemblent en deux grands groupes : les facteurs externes ou objectifs regroupés dans les caractéristiques média et les facteurs internes ou subjectifs regroupés dans les caractéristiques de l'utilisateur (Riva, Davide, & IJsselsteijn, 2003).

- Les facteurs externes ou objectifs ou caractéristiques médias contiennent les éléments d'immersion et d'interactivité définis par la qualité de l'étendue sensorielle de l'information présentée au sujet, le niveau de contrôle du sujet, sa possibilité de modifier l'EV (Sheridan, 1992), la présence spatiale du sujet, son engagement, ainsi que le niveau de réalisme et de naturalisme de la situation (Lessiter et al., 2001; Schubert, Friedmann, & Regenbrecht, 2001).
- Les caractéristiques utilisateur ou subjectives quant à eux regroupent les dispositions cognitives et motrices de l'utilisateur, sa perception de la situation ainsi que ses caractéristiques plus personnelles telles que ses traits de caractère, ses besoins, ses préférences, son genre, son âge, ses compétences, etc. (Riva et al., 2003).

1.5.2 MESURES DE LA PRÉSENCE EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

Étant avant tout la réponse subjective du sujet à un système immersif, la mesure de la présence en EV ne peut qu'être propre à chaque utilisateur. Ainsi, trois principaux types de mesure peuvent être utilisés :

- Des questionnaires de présence : le questionnaire couramment utilisé est celui proposé par Witmer et Singer (1998). Ce questionnaire évalue à la fois les caractéristiques de l'individu et les caractéristiques de l'EV.
- Des mesures physiologiques : les mesures les plus utilisées pour évaluer la présence en EV sont : le rythme cardiaque, la conductance de la peau, la transpiration, la température de la peau ou la tension musculaire (Insko, 2003).
- Des mesures comportementales : dans cette catégorie, on peut noter la performance de l'utilisateur, ses actions réflexes et le contrôle sensori-moteur (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006).
 - La performance regroupe tout ce qui est en lien avec la capacité du sujet à réaliser une tâche en EV. Pris à part, ce paramètre pourrait biaiser l'évaluation (Slater & Wilbur, 1997) autant à cause des habiletés du sujet qu'à cause des interfaces mises à sa disposition. Une évaluation comportementale plus poussée peut être faite avec les actions réflexes du sujet. Un sujet ressentant un fort sentiment de présence aura tendance à effectuer certaines actions comme dans la réalité (exemple : essayer machinalement de toucher ou de saisir un objet virtuel ou d'interagir avec un personnage virtuel).
 - Les actions réflexes peuvent aussi aller jusqu'à toucher le côté émotionnel du sujet (exemple : éprouver de la compassion pour un personnage virtuel).

- Le contrôle sensori-moteur favorise le sentiment de présence chez le sujet (Sheridan, 1992). Ce dernier adopterait par exemple un comportement prudent en avançant vers une zone dangereuse (Slater, 2002).

1.6 CONCLUSION

Le but de ce chapitre était de présenter les caractéristiques de la RV à considérer pour offrir à l'utilisateur la sensation d'appartenir à un monde artificiel et de participer activement au déroulement de l'histoire de ce monde. Dans le prochain chapitre, nous présenterons comment ces technologies sont exploitées dans le traitement du trouble de stress post-traumatique.

CHAPITRE 2

LE TROUBLE DE STRESS POST-TRAUMATIQUE ET SES TRAITEMENTS

Résumé : Ce chapitre est axé sur la présentation du trouble de stress post-traumatique. Après la présentation des statistiques et coûts y reliés, nous décrivons ce trouble d'abord selon la cinquième édition du *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-V)*, et ensuite selon les théories de l'apprentissage. Nous terminons avec la description des principaux traitements qui ont été exploités à ce jour pour le trouble de stress post-traumatique.

2.1 DONNÉES ÉPIDEMIOLOGIQUES ET COÛTS AU CANADA

Au Canada, une personne sur cinq est affectée par un trouble mental chaque année (Smetanin, Briante, Stiff, Ahmad, & Khan, 2015). Cette situation entraîne de graves conséquences autant sur la qualité de vie du sujet touché que sur la société. La charge économique et sociale annuelle liée aux soins hospitaliers, à la médication, à la perte de productivité et à la qualité de vie est estimée à \$ 51 milliards (Lim, Jacobs, Ohinmaa, Schopflocher, & Dewa, 2008; Smetanin et al., 2015).

Selon les statistiques analysées en 2008 (Van Ameringen, Mancini, Patterson, & Boyle), 75,9% de la population canadienne sont exposés à un ou plusieurs événements traumatiques au cours de leur vie. Le taux effectif de prévalence du Trouble de Stress Post-Traumatique (TSPT) dans cette population est de 9,2%. Sans toutefois se limiter au seul sujet touché dont la maladie entraîne une dégradation de la qualité de vie personnelle, professionnelle et sociale, le TSPT engendre des coûts très élevés pour la société, avec notamment un chiffre de \$21 milliards associés à la perte de productivité chaque année (Wilson, Guliani, & Boichev, 2016).

2.2 DESCRIPTION DU TSPT

2.2.1 DESCRIPTION DU TSPT SELON LA CINQUIÈME ÉDITION DU DSM-V

C'est en 1980 que le TSPT est classé comme trouble mental dans le *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (DSM) (Friedman, 2007). Selon la version la plus récente de ce manuel (le DSM-V), le TSPT survient chez un individu à la suite d'un trauma, c'est-à-dire une situation ayant menacé sa santé ou son bien-être (APA, 2013; Brewin, Dalgleish, & Joseph, 1996). Le vécu de la situation traumatique peut être direct (le sujet est victime de la situation traumatique) ou indirect (le sujet est témoin de la situation). Le trauma peut être de différente nature : accident de la route, attaque terroriste, guerres, agressions, violences, catastrophes naturelles ou provoquées, etc. Le TSPT commence à se manifester lorsqu'à la suite du trauma, le sujet a à répétition des souvenirs intrusifs, des *flashbacks* et des cauchemars qui provoquent un fort sentiment de vulnérabilité. Ainsi, le sujet a tendance à éviter autant les stimuli physiques (objets, lieux, activités, situations) que les pensées ou souvenirs en rapport avec son trauma. Lorsqu'il entre en contact avec ces stimuli, il adopte des comportements de détresse physique et des réactions physiologiques démesurées (accélération du rythme cardiaque, transpiration, ...). De plus, la cognition et l'humeur du sujet sont altérées par l'évènement traumatique au point où ce dernier peut se retrouver dans l'incapacité de se rappeler de la scène de son trauma. Il a des croyances négatives vis-à-vis de lui-même et du monde. Il a tendance à trouver le monde comme un endroit particulièrement dangereux et se sent incapable d'y faire face. Il se retrouve constamment dans des états émotionnels négatifs manifestés par la crainte, l'horreur, la colère, l'impuissance ou la culpabilité. Plus précisément, le sujet peut chercher à se blâmer lui-même ou à blâmer les autres pour la situation traumatique et a du mal à admettre qu'il n'aurait rien pu faire pour l'empêcher.

Il peut aussi avoir des comportements irréfléchis et autodestructeurs (suicide par exemple). Le sujet peut être physiquement ou verbalement agressif et avoir des problèmes de concentration. L'hyperéveil et l'hypervigilance sont d'autres symptômes caractéristiques du TSPT. L'attention du sujet est développée, notamment quant aux stimuli qui pourraient lui rappeler son trauma. Tous ces symptômes et ces malaises ont des répercussions négatives autant sur sa santé générale que sur sa vie familiale, sociale et professionnelle.

2.2.2 DESCRIPTION DU TSPT SELON LES THÉORIES DE L'APPRENTISSAGE ET LA THÉORIE DU TRAITEMENT ÉMOTIONNEL

Face à toute situation considérée menaçante, l'être humain est naturellement habité par un sentiment de peur accompagné de réponses physiologiques, émotionnelles, et comportementales (Clark & Beck, 2011). Ces réponses ressenties, propres à la situation, peuvent diminuer avec le temps et même disparaître. Cependant, chez certains individus elles perdurent et passent de la peur à l'anxiété, devenant ainsi une pathologie. La plupart des personnes ayant vécu un événement traumatique se remettent naturellement en subissant (de manière consciente ou non) des expositions naturelles dans leur vie de tous les jours (Rothbaum & Davis, 2003). Cependant, chez certaines personnes, les symptômes précédemment cités peuvent survenir à tout moment après l'évènement traumatique et durer de longues périodes, pouvant aller d'une à plusieurs années (Rothbaum & Davis, 2003). Les réactions liées à la situation traumatique deviennent ainsi des réflexes chez le sujet qui a tendance à adopter des comportements d'évitement, d'hypervigilance, d'agressivité et de repli sur soi. Nous expliquons cela par la théorie béhavioriste de l'apprentissage développée par Pavlov (Malone, 1991). Selon cet auteur, une réaction devient *réflexe* lorsque les hémisphères cérébraux créent une

association entre un (ou plusieurs) stimulus (i) et ladite réaction. Il qualifie cette dernière de réflexe psychique ou réflexe conditionnel ou réflexe appris, par opposition aux réflexes inconditionnels qui existent par essence (Malone, 1991). Dans son expérience avec le chien, Pavlov avait constaté qu'en approchant le repas d'un chien (stimulus inconditionnel)¹ et en émettant en même temps le son d'une cloche (stimulus neutre)², le chien se mettait à saliver (réponse inconditionnelle)³; et au bout d'un certain temps, seul le son de la cloche (devenu stimulus conditionnel)⁴ suffisait pour faire saliver le chien (réponse conditionnelle)⁵. Ce dernier avait alors fait un nouvel apprentissage, il a développé un nouveau réflexe en créant une association entre le son de la cloche et le repas. À l'image du chien de Pavlov, nous émettons l'hypothèse que les personnes victimes ou ayant été témoin d'une situation traumatique ont tendance à associer négativement les indices du trauma perçus dans les situations saines de leurs vies, au danger ou à l'inconfort.

D'un point de vue de la théorie du traitement émotionnel définie par Foa et Kozak (1986), ceci est dû à l'installation dans la mémoire du sujet, au fil du temps, d'un réseau de peur qui caractérise ses émotions (voir Figure 1). Ce réseau de peur est constitué de trois éléments principaux :

- Les stimuli : objets, odeurs, sons, endroits, mémoires, situations, images... qui étaient présents au cours de la situation traumatique. Exemple : la guerre et tout ce qui tourne autour;

¹ Un stimulus inconditionnel (SI) est un stimulus qui par essence génère la réponse associée.

² Un stimulus neutre (SN) est un stimulus qui ne génère normalement pas la réponse associée.

³ Une réponse inconditionnelle (RI) est une réponse qui est par essence liée au stimulus associé.

⁴ Un stimulus conditionnel est un stimulus qui génère une réponse qu'il n'est pas censé générer.

⁵ Une réponse conditionnelle est une réponse liée à un stimulus conditionnel

- Les réponses à ces stimuli : anxiété, colère, stress, angoisse, augmentation du rythme cardiaque, transpiration, etc;
- Les significations que le sujet donne à **ces stimuli** : c'est très dangereux d'être dans un bulldozer; *et à ces réponses* : l'accélération de mon rythme cardiaque signifie que je suis anxieux, que je suis effrayé.

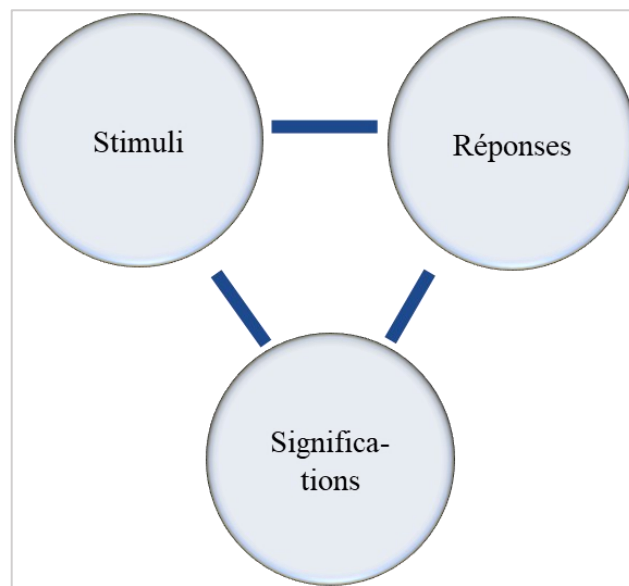


Figure 1 : Notre représentation du réseau de peur associé au TSPT

Ce réseau de peur pousse le sujet à nourrir sa pensée d'impuissance face au monde (Foa, Hembree, & Rothbaum, 2007). La cognition du sujet n'est pas à négliger; le fait de considérer le monde et son contenu comme malsain, de se sentir incapable de l'affronter, d'éviter de repenser à tout ce qui a trait à son trauma, ne l'aide pas à se remettre de son trauma. Là encore, nous expliquons cela par le conditionnement opérant de Skinner qui précise que l'individu a tendance à répéter les actions qui produisent des récompenses et à éviter celles qui produisent des punitions (McLeod, 2007). On voit bien que cela se manifeste aussi chez le sujet ayant été exposé à un événement traumatique. En effet, les critères diagnostiques de TSPT tels que précédemment mentionnés placent l'évitement comme signe distinctif de maintien du TSPT. Même si cela semble faire du bien au sujet

à court terme, ça n'en est pas une bonne stratégie pour faire disparaître les malaises de manière permanente. Il s'agit tout simplement d'un renforcement négatif des actions et cognitions négatives du sujet (penser que le monde est dangereux, se considérer impuissant), ce qui maintiendrait le TSPT à long terme (Foa et al., 2007).

2.3 APPROCHES THÉRAPEUTIQUES POUR LE TSPT

Depuis la première apparition du TSPT dans le DSM, la littérature présente deux principales méthodes de traitement: la pharmacothérapie et la psychothérapie (DiPiro et al., 2014).

- La pharmacothérapie consiste en la prise de médicaments suivant une posologie prescrite par un spécialiste du domaine. Les médicaments les plus suggérés par l'*American Psychiatric Association (APA)* sont : la fluoxétine, la paroxétine, la sertraline, et la venlafaxine (APA, 2017a). Cependant, cette méthode de traitement peut présenter des effets indésirables tels que la dépendance, les nausées, l'insomnie, la prise de poids, ... (DiPiro et al., 2014). Il est donc recommandé de l'associer à une démarche psychothérapeutique (APA, 2017a).
- La psychothérapie consiste en des sessions de rencontre entre un thérapeute et le sujet dans le but d'amener ce dernier à mieux gérer l'anxiété et d'autres symptômes associés à son trauma, et ainsi à améliorer sa qualité de vie (APA, 2017b). Dans cette méthode de traitement, la thérapie cognitivo-comportementale est le traitement psychothérapeutique produisant de meilleurs résultats contre le TSPT (APA, 2017b). Des études utilisant la thérapie cognitivo-comportementale ont montré un maintien des gains

thérapeutiques aux suivis de 3 à 12 mois après le traitement (Davidson, 2004; DiPiro et al., 2014). Une définition de la thérapie cognitivo-comportementale qui nous semble explicite est celle proposée par Zayfert et Becker :

“CBT is a structured form of psychotherapy resulting from a marriage between behavior modification strategies, which are rooted in behavioral science (or “behavior analysis”), and cognitive therapy, which is linked to cognitive models of psychopathology” (Zayfert & Becker, 2006).

La logique qui supporte cette thérapie est que le trouble du patient est issu d'un apprentissage qui crée chez lui des cognitions dysfonctionnelles dû à l'association d'un stimulus conditionnel (exemple : les camions) à un stimulus inconditionnel (exemple : l'accident de la route) pour produire une réponse qui, à la base inconditionnelle (peur), devient conditionnelle par renforcement négatif (anxiété, stress, colère, culpabilité) (Zayfert & Becker, 2006). Elle est basée sur les théories béhavioristes et cognitivistes de l'apprentissage et aurait donc pour but de modifier les cognitions et comportements problématiques du sujet et de les remplacer par ceux qui sont sains (Zayfert & Becker, 2006). À ce jour, la forme de thérapie cognitivo-comportementale la plus efficace contre le TSPT avec des preuves empiriques concrètes et proposée en première ligne par l'APA est la thérapie par exposition (APA, 2017a).

2.3.1 LA THÉRAPIE PAR EXPOSITION

La thérapie par exposition consiste à confronter le sujet directement ou indirectement à son trauma. Cette thérapie repose sur le principe que la confrontation du patient à l'objet de son anxiété en l'absence de danger réduirait les symptômes de stress post-traumatique. Plusieurs travaux ont basé la thérapie par exposition sur un mécanisme

d'extinction qui consiste à soumettre de manière répétée le patient aux stimuli conditionnels en l'absence de stimuli inconditionnels afin de diminuer ou d'éliminer les cognitions négatives associées au trauma, et par conséquent, l'intensité de la réponse (Rothbaum & Davis, 2003). Cependant, Powers, Smits, Leyro et Otto (2007) soulignent que la thérapie n'est pas à considérer comme un désapprentissage systématique des cognitions problématiques, mais plutôt comme un nouvel apprentissage d'associations saines. Ceci est d'autant plus vrai qu'après extinction dans un contexte, le changement de contexte, ou certains événements stressants pourraient entraîner de nouveau la réponse conditionnelle chez le sujet (Bouton & Bolles, 1979; Pavlov, 1927; Rescorla & Heth, 1975).

2.3.2 FORMES D'EXPOSITION

Il existe trois principales formes d'exposition :

- L'exposition *in-vivo* : cette forme d'exposition consiste à confronter le patient aux conditions réelles similaires à celles de son trauma (Nugent, 2013). Même si certaines études ont reporté de bons résultats pour cette forme d'exposition, elle présente plusieurs inconvénients. Premièrement, elle peut être très radicale pour le patient, car sa mémoire de peur risquerait de se voir activée très rapidement. Deuxièmement, elle est souvent très coûteuse, car elle peut nécessiter du matériel physique à des prix très onéreux (exemple : un avion pour quelqu'un dont le TSPT est lié à l'avion). Troisièmement, elle peut être difficile, voire impossible à réaliser, car il pourrait être impossible de reproduire la situation traumatique (exemple, le cas des troubles liés aux accidents).

- L'exposition par imagination : durant cette forme d'exposition, le patient est amené à narrer son trauma sous le contrôle de son thérapeute (Abramowitz, Deacon, & Whiteside, 2019). Cette forme d'exposition présente aussi quelques inconvénients, notamment, la difficulté ou le manque de volonté du patient de repenser à son trauma (Difede & Hoffman, 2002; Kosslyn, Brunn, Cave, & Wallach, 1984). Aussi, le contrôle du thérapeute peut être limité vis-à-vis des pensées du patient. Les médias (photos ou vidéos) sont souvent utilisés pour aider le patient dans sa narration, mais dans certains cas, les inconvénients perdurent (Difede & Hoffman, 2002; Kosslyn et al., 1984).
- L'exposition *in-virtuo* : cette forme d'exposition utilise les technologies de la Réalité Virtuelle (RV) et la simulation pour :

« créer un environnement virtuel sécuritaire avec la possibilité de permettre aux patients de «revivre» leurs expériences de manière approfondie et efficace en les exposant lentement aux événements exacts ou similaires à l'origine de l'anxiété » (Wiederhold & Bouchard, 2014).

L'un des principaux inconvénients qu'on puisse attribuer à cette dernière forme d'exposition c'est la non-familiarisation éventuelle des utilisateurs finaux avec les technologies, ainsi que le risque de cyber malaises durant le processus d'exposition. Les cyber malaises étant des inconforts ressentis par les utilisateurs lors de l'utilisation de dispositifs de RV (Davis, Nesbitt, & Nalivaiko, 2014).

2.3.3 PROGRAMME D'EXPOSITION PROLONGÉE

Foa et al. (2007) ont proposé un programme d'exposition ayant une efficacité amplement documentée par la littérature et pouvant s'appliquer à chacune des trois formes d'exposition. Il s'agit du programme d'exposition prolongée. Ce programme

consiste à confronter, sur une période relativement longue, le patient à la simulation de son trauma afin de diminuer les symptômes de TSPT et d'autres symptômes relatifs au trauma. La durée de traitement suivant un programme d'exposition prolongée varie selon les aptitudes et la sévérité du trouble de chaque patient. L'exposition prolongée trouve ses racines dans la théorie du traitement émotionnel (Foa & Kozak, 1986).

2.3.4 THÉORIE DU TRAITEMENT ÉMOTIONNEL

Le mode d'action explicité par la théorie du traitement émotionnel est la modification de la mémoire de peur du sujet pour y incorporer de nouvelles informations saines et incompatibles avec celles qui s'y trouvent. Le processus du traitement émotionnel se fait en deux étapes :

- 1) L'activation de la mémoire de peur à l'aide des stimuli anxiogènes, mais non dangereux ;
- 2) L'installation de l'information correctrice.

La nature non dangereuse des stimuli simulés doit permettre l'incorporation d'associations saines et contradictoires avec celles qui se trouvent dans le réseau de peur.

2.3.5 PROTOCOLE GÉNÉRAL DU PROGRAMME D'EXPOSITION PROLONGÉE

L'exposition prolongée est un protocole thérapeutique d'intervention dont le nombre original de sessions varie de neuf à douze selon les besoins et la progression de chaque patient. Tel que décrit dans le manuel *Prolonged exposure therapy for PTSD: Emotional processing of traumatic experiences therapist guide* (Foa et al., 2007), le programme commence par une phase de *psychoéducation* au cours de laquelle le thérapeute donne au patient un aperçu de la thérapie tout en le sensibilisant sur les

difficultés (notamment liées à l'engagement émotionnel) que ce dernier pourrait avoir au cours des sessions. Durant cette phase, le patient et le thérapeute dressent ensemble une liste de situations anxiogènes sur lesquelles ils se focaliseront tout au long du programme de traitement. Cette phase est très importante, car elle vise aussi à favoriser l'adhésion au traitement et limiter l'abandon. Dans les débuts du traitement, il est également proposé au patient une rééducation à la respiration qui va lui permettre d'affronter l'anxiété lorsque cela va survenir dans sa vie de tous les jours. Après la phase préparatoire commence la phase d'exposition prolongée sécuritaire et graduelle du patient (*in-vivo*, par imagination ou *in-virtuo*). Ces sessions constituent le cœur du programme d'exposition prolongée. Elles ont pour but le traitement émotionnel des mémoires de trauma afin d'amener le patient à affronter ses peurs et à comprendre que la représentation qu'il a du monde n'est pas la réalité. À la fin du traitement, un compte rendu est effectué pour prévenir la rechute et donner des conseils au patient pour sa vie future.

2.4 CONCLUSION

Le but de ce chapitre était de décrire le contexte d'application de notre recherche. Nous y avons décrit le TSPT, ses causes, ses conséquences et les principaux traitements qui existent pour y faire face dont la thérapie par exposition. Elle est conseillée en première ligne par l'APA et peut prendre trois formes : par imagination, *in vivo* et *in virtuo*. Notre recherche s'est basée sur l'exposition *in virtuo*. Alors, dans le prochain chapitre, nous présentons les bénéfices et potentiels de la RV pour l'exposition. Ensuite, nous faisons une revue de la littérature des outils de thérapie d'exposition par la réalité virtuelle utilisés à ce jour, ainsi que des études de traitement avec ces outils.

CHAPITRE 3

LA THÉRAPIE D'EXPOSITION PAR LA RÉALITÉ VIRTUELLE POUR LE TRAITEMENT DU TROUBLE DE STRESS POST-TRAUMATIQUE

Résumé : Les environnements virtuels de la réalité virtuelle sont des simulations. En ce sens, le but d'utiliser ces technologies est non pas de reproduire numériquement la réalité, mais plutôt de matérialiser certains aspects du monde réel en fonction des buts. Dans le cadre du traitement du trouble de stress post-traumatique, on pourrait simuler des aspects qu'il n'est pas souhaitable de représenter dans la réalité (par exemple, un écrasement d'avion). La simulation a cet autre avantage d'être répétée autant de fois que possible sans que cela n'engendre des besoins matériels ou des coûts significatifs. Dans ce chapitre, nous nous intéressons de plus près à l'exploitation des technologies de la réalité virtuelle dans le traitement du trouble de stress post-traumatique. Nous commençons par présenter les bénéfices potentiels de la réalité virtuelle pour la thérapie. Ensuite, nous analysons les différents outils de thérapie d'exposition par la réalité virtuelle qui ont déjà été proposés à ce jour. Nous nous intéressons particulièrement à leur qualité en termes de mise en application des caractéristiques principales de la réalité virtuelle. Subséquemment, nous faisons une discussion dans laquelle nous soulignons les manquements observés dans ces outils.

3.1 BÉNÉFICES POTENTIELS DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE POUR LE TRAITEMENT DU TROUBLE DE STRESS POST-TRAUMATIQUE

Au vu du potentiel de la Réalité Virtuelle (RV), ces technologies restent un outil de choix pour le traitement du Trouble de Stress Post-Traumatique (TSPT) autant en termes de flexibilité de scénarios, de paramétrisation qu'en termes d'efficacité. La Thérapie d'Exposition par la Réalité Virtuelle (TERV) pourrait combler les inconvénients des expositions par imagination et *in vivo* à plusieurs niveaux :

- Au niveau de la simulation, il est possible de créer un environnement numérique en grandeur réelle et en rapport avec la situation traumatique à la base du trauma du patient. La simulation permet aussi de représenter divers scénarios de thérapie, même les événements difficiles, impossibles ou non

souhaitables à matérialiser dans la vie réelle (exemple, un tremblement de terre ou un écrasement d'avion). Le logiciel de simulation est généralement conçu pour être paramétrable (selon chaque patient), contrôlable par le thérapeute (intensité des stimuli, météo, temps de la journée...) et pour pouvoir offrir la possibilité de répéter autant de fois que nécessaire un même scénario de thérapie.

- Au niveau multisensoriel, l'utilisation de stimuli orientés vers différents canaux sensoriels améliore l'immersion du patient et pourrait permettre de générer chez ce dernier un sentiment de présence.
- Au niveau de la contribution du patient, l'Environnement Virtuel (EV) qui est *à priori* sécuritaire peut faciliter l'adhésion et l'engagement de certains patients au traitement.
- Au niveau des délais et coûts, l'exposition peut être conduite dans de multiples contextes sans délais et coûts exorbitants.
- Au niveau du transfert de compétences, le naturel des interactions, dans le cas où elles sont mises en avant dans l'outil de RV, pourrait faciliter la généralisation des habiletés apprises durant la thérapie à la vie post-thérapie du patient.
- Au niveau de la vie privée, la thérapie peut se faire de façon privée et confidentielle pour les patients qui préfèrent la discrétion qu'ils ne peuvent avoir lors de l'exposition *in vivo* par exemple.
- Au niveau de l'évolution personnelle du patient, celui-ci perçoit en temps réel son auto-efficacité durant la thérapie au moyen de ses interactions. De plus cette auto-efficacité perçue est observable par le thérapeute.

- Un autre avantage que la RV pourrait offrir à la TERV serait l'intégration d'un thérapeute en temps réel dans l'EV afin de transporter le concept de soins personnels en thérapie dans l'EV (Dayan, 2006).
- Enfin, le sentiment de présence qui est souvent généré lors de l'immersion favorise l'engagement émotionnel du patient dans la thérapie et facilite de ce fait l'accès à sa mémoire de peur pour l'installation de l'information correctrice.

3.2 ANALYSE DES OUTILS DE TERV POUR LE TSPT

Depuis quelques décennies, plusieurs études scientifiques témoignent des apports de la TERV dans le traitement de nombreux troubles mentaux notamment la dépendance (Girard, Turcotte, Bouchard, & Girard, 2009), le TSPT (Gonçalves, Pedrozo, Coutinho, Figueira, & Ventura, 2012) et les phobies spécifiques telles que la claustrophobie (Botella et al., 1998; Botella, Baños, Villa, Perpiñá, & García-Palacios, 2000), l'acrophobie (Emmelkamp et al., 2002; Rothbaum, Hodges, Watson, Kessler, & Opdyke, 1996; Rothbaum et al., 1995), l'aviophobie (Rothbaum et al., 2006; Rothbaum, Hodges, Smith, Lee, & Price, 2000; Rothbaum et al., 1996) et l'arachnophobie (Carlin, Hoffman, & Weghorst, 1997; Garcia-Palacios, Hoffman, Carlin, Furness Iii, & Botella, 2002). Dans ces études, l'environnement 3D conçu pour une TERV est généralement explorable à l'aide d'un casque de rendu stéréoscopique posé sur la tête du patient et doté de capteurs permettant de suivre les mouvements de la tête afin d'adapter le rendu visuel en fonction de sa position. D'autres outils procurant des sensations tactiles comme des vibrations sont souvent utilisés. Des sons sont rajoutés via un casque audio pour stimuler la modalité

auditive du sujet et dans certains cas, des palettes d'odeurs sont placées dans la pièce pour distiller des odeurs en fonction de la scène courante présentée dans l'EV.

Dans cette section, nous faisons une revue de la littérature afin d'analyser les outils de RV qui ont été développés à ce jour pour traiter les patients atteints de TSPT. Nous regardons particulièrement la mise en œuvre ou non des interactions sensori-motrices dans l'outil, ainsi que leur utilisation en thérapie. Nous avons recensé au total huit outils ayant été utilisés pour simuler diverses situations traumatisantes telles que les guerres, les attaques terroristes, les agressions avec violence et les accidents de véhicule à moteur. Nous avons ensuite analysé les travaux de traitement ayant été effectués avec ces outils, ainsi que les études randomisées ou non, comparant la TERV à d'autres conditions de traitement. Les points qui suivent présentent le résultat de cette recension des écrits.

3.2.1 SYSTÈME VIRTUAL VIETNAM

Les technologies de la RV ont été utilisées pour la première fois dans le traitement du TSPT à la fin des années 90. Sur la base des résultats positifs du traitement de l'acrophobie par TERV, Rothbaum et al. (1999) ont émis l'hypothèse qu'une exposition prolongée à un traumatisme dans un EV sécuritaire diminuerait considérablement les symptômes du TSPT. Ils ont ainsi créé le système *Virtual Vietnam* pour traiter les anciens combattants de la guerre du Vietnam atteints de TSPT chronique. Ce système plongeait les patients dans un monde 3D dont le contenu était similaire à deux situations rencontrées pendant la guerre du Vietnam : une clairière dans la jungle et un hélicoptère. Dans ces deux environnements étaient présentés à l'utilisateur des stimuli visuels, tels que le brouillard et le vol ou l'atterrissage d'hélicoptères, accompagnés de stimuli auditifs, tels que les bruits de la jungle, des armes à feu et des hélicoptères. Ces stimuli auditifs étaient

utilisés pour rendre l'EV plus réaliste pour le patient, car, comme le précisent les auteurs, écouter ce son est une expérience terrifiante pour les vétérans de l'armée. Dans l'EV d'hélicoptère, le sujet pouvait voir autant l'intérieur de l'appareil que des plans d'autres hélicoptères en vol, la jungle et une rivière à travers la porte latérale de l'hélicoptère. Les EV étaient explorés à l'aide du *virtual Research V6*, un casque qui prend en charge le rendu visuel et auditif de la scène 3D présentée à l'utilisateur. Ce système utilise deux écrans de résolution 640 × 480, un pour chaque œil, ainsi qu'un système de *tracking*, qui met à jour la scène en temps réel en fonction de la position de la tête du patient. Pour améliorer l'immersion des patients, des stimuli vibro-tactiles étaient ajoutés à l'aide d'un woofer attaché à leur siège pour simuler les vibrations de l'hélicoptère en fonction de la scène présentée dans l'EV. Le son transmis par les écouteurs était également destiné à correspondre à la scène présentée sur les écrans ; les vibrations du fauteuil correspondaient au tremblement de la scène virtuelle. Le scénario était conçu pour être mis à jour manuellement par le thérapeute en fonction de la narration du patient pendant les séances.

À l'issue des tests préliminaires du système *Virtual Vietnam* les auteurs ont remarqué que les patients n'ont pas forcément toléré « *l'effet cartoon* » des environnements qui leur ont été proposés et semblaient réclamer un maximum de réalisme (Hodges et al., 1999). De plus, les participants ont souligné un manque de diversité des situations du système.

Dans la même année, une étude de cas a été effectuée en utilisant le même système pour traiter un patient souffrant de TSPT (Rothbaum et al., 1999). Le patient était un vétéran de la guerre du Vietnam ayant déjà effectué un traitement de groupe sans succès.

À la fin de sa thérapie de quatorze sessions de quatre-vingt-dix minutes effectuées pendant sept semaines, une réduction des symptômes du TSPT a été observée chez le patient, passant de sévère à modérée.

Cet outil a été réexploité en 2001 pour le traitement de dix vétérans de la guerre du Vietnam (Rothbaum, Hodges, Ready, Graap, & Alarcon, 2001). À l'issue de cette étude, les chercheurs ont observé chez huit patients, au suivi de six mois, une réduction de 15 à 67% sur les symptômes du TSPT.

En 2003, Rothbaum et al. (2004) ont effectué une autre étude de cas en utilisant ce même système *Virtual Vietnam*. Le participant de cette étude était un vétéran de la guerre du Vietnam ayant vécu plusieurs événements traumatiques. Son traumatisme se manifestait non seulement par l'anxiété, mais aussi par la culpabilité, la colère et la honte. Outre l'auto-rapport du patient, ces symptômes ont été également évalués par des mesures psychophysiologiques (rythme cardiaque et conductance de la peau) au pré-traitement, au post-traitement, au troisième mois et au sixième mois après le traitement. Les chercheurs rapportent que le patient a présenté une réduction des symptômes du TSPT tels et un maintien au troisième et au sixième mois après le traitement. Le niveau d'activité physiologique du patient avait également diminué du pré-traitement au post-traitement.

Dans leur étude, Ready et al. (2006) ont exploité le système *Virtual Vietnam* pour effectuer deux essais ouverts ⁶ de l'utilisation de la RV pour le traitement des vétérans de la guerre du Vietnam souffrant de TSPT. Un total de vingt-et-un patients ont été recrutés

⁶ « Essai clinique au cours duquel aucun des participants (sujet, investigateur, chercheur responsable des analyses, etc.) n'est tenu dans l'ignorance du traitement administré » (OQLF, 2000a).

et seulement quatorze ont suivi l'étude jusqu'à la première évaluation post-traitement. Les vétérans ont suivi huit à vingt sessions de quatre-vingt-dix minutes d'exposition. Les situations anxiogènes présentées aux patients dans l'EV étaient adaptées à la situation spécifique de peur de chacun. Les données d'évaluation ont été relevées avant et pendant le traitement, ainsi qu'au troisième mois et au sixième mois après le traitement. En dehors de deux patients qui ont présenté une augmentation significative de leur niveau d'anxiété à l'issue du traitement, les résultats étaient plutôt satisfaisants. Il y a eu diminution des symptômes de TSPT (une réduction de 15 à 67%) chez les autres patients au suivi de trois mois, et un maintien de cette réduction pour dix des onze patients ayant fait le suivi de six mois.

De l'analyse de ces études préliminaires, on peut remarquer que, même si dans l'ensemble les traitements n'étaient pas fructueux, le système *Virtual Vietnam* a permis de poser des bases prometteuses concernant l'utilisation de la RV pour le traitement du TSPT.

3.2.2 SYSTÈME VIRTUAL IRAQ/AFGHANISTAN OU BRAVEMIND DANS SA VERSION ACTUELLE

Rizzo et al. (2006) ont présenté les résultats du projet *Virtual Iraq*, dans lequel ils ont réutilisé les composants graphiques et sonores du jeu sur Xbox "Full Spectrum Warrior" pour créer un outil de TERV pour les vétérans de la guerre d'Iraq/Afghanistan souffrant de TSPT. Cet outil propose plusieurs EV possibles en rapport avec les villes, les villages et les déserts du Moyen-Orient. Le patient peut explorer ces scénarios suivant plusieurs perspectives comme marcher seul, en patrouille ou se déplacer dans un véhicule de guerre à l'aide d'une manette de jeu. L'outil intègre également une interface qui permet

au thérapeute de superviser la thérapie en sélectionnant des EV et en modulant le niveau d'anxiété des stimuli en fonction des besoins spécifiques de chaque patient. Quatre principaux types de stimuli sont inclus pour maximiser l'immersion des patients : 1) auditif (tir d'armes, explosions, bruit de véhicule, vent, voix humaines) ; 2) image statique (restes d'humains, civils et combattants blessés, véhicules accidentés) ; 3) visuel dynamique (vues éloignées des mouvements humains et véhicules) ; et 4) audiovisuel dynamique (mouvements humains et véhicules à proximité, engagement sur le champ de bataille avec les combattants ennemis). À l'instar de l'outil virtuel Vietnam, ces différentes informations sensorielles sont présentées parallèlement au sujet lors de l'exposition. Le visuel est affiché sur un casque possédant un système de suivi de la tête à trois degrés de liberté. Les stimuli olfactifs sont générés par une palette d'odeurs capable de distiller plusieurs odeurs différentes en fonction de la scène présentée au patient à un moment donné. Les odeurs incluses sont celles du caoutchouc brûlé, de la cordite, des ordures, des senteurs corporelles, de la fumée, du carburant diesel, des épices irakiennes et de la poudre à canon. Les stimuli vibro-tactiles sont ajoutés avec un transducteur sonore qui convertit le signal audio en vibrations.

BRAVEMIND (*Battlefield Research Accelerating Virtual Environments for Military Individual Neuro Disorders*) (Rizzo et al., 2017) est la version améliorée de l'outil *Virtual Iraq*. Il comprend quatre sous-systèmes : un sous-système BRAVEMIND *Virtual Irak / Afghanistan* pour le traitement du TSPT lié au combat, une extension pour le personnel médical et paramédical de combat, une extension BRAVEMIND-MST pour les traumatismes sexuels militaires et une extension pour l'évaluation du TSPT. Les principales améliorations concernent la reconstruction des scénarios précédents, l'ajout de dix nouveaux scénarios et davantage de capacités permettant au clinicien de contrôler

l'EV via un panneau de contrôle. Comme dans le précédent outil *Virtual Iraq*, l'utilisateur peut se déplacer dans l'EV à l'aide d'une manette de jeu et peut l'explorer visuellement à 360 degrés à l'aide d'un casque de RV. Dans l'extension médicale, les efforts de développement se sont concentrés sur le réalisme visuel à la fois en termes de graphismes et d'animations de personnages blessés. Le sous-système BRAVEMIND-MST est décrit à la section 3.2.3 (Mozgai, Hartholt, Leeds, & Rizzo, 2020). Dans l'ensemble du système, les modalités exploitées restent les mêmes que pour le précédent outil *Virtual Iraq*. Nous analysons ici les études qui ont été effectuées avec ces systèmes.

L'outil *Virtual Iraq* a été placé en expérimentation dans plusieurs centres. Rizzo et al. (2007) ont rapporté deux cas d'étude avec deux combattants de la guerre d'Iraq qui ont bien voulu suivre leur processus de traitement avec cet outil. La première patiente était une jeune femme âgée de 22 ans qui présentait les critères diagnostiques de TSPT selon le DSM-IV ⁷ à la suite de son service en Iraq. À la fin du protocole thérapeutique de dix sessions incluant la psychoéducation, l'exposition par imagination, l'exposition *in virtuo* et des exercices d'exposition *in vivo* entre les sessions, cette patiente a vu son état s'améliorer. Plus précisément elle a eu une diminution de plus de 50% des symptômes de TSPT et un maintien de ces gains thérapeutiques au suivi de trois mois post-traitement.

Le deuxième cas est celui d'un patient de la marine américaine âgé de 29 ans souffrant de TSPT avec tentative de suicide depuis son retour d'un déploiement de sept mois en Iraq. Après son diagnostic de TSPT, le patient a refusé de participer à une étude standardisée tout en manifestant sa volonté de participer à la TERV. Ce traitement lui a été administré en six sessions bi-hebdomadaires de 90 à 120 minutes, incluant la thérapie

⁷ Quatrième édition du manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (DSM)

de soutien, l'exposition par imagination et la TERV. À la fin du traitement, le patient a présenté de nettes améliorations avec une diminution globale des symptômes d'environ 65% sur les mesures utilisées. En dehors de ces deux patients traités avec succès, les auteurs de cette étude soulignent deux cas d'abandon et un cas de fin de traitement sans résultat thérapeutique satisfaisant dans d'autres centres où ils ont testé l'outil.

Afin d'évaluer la qualité de l'outil, le système a également été testé par 93 soldats en service actif ne présentant pas les critères diagnostiques de TSPT (Reger, Gahm, Rizzo, Swanson, & Duma, 2009). En moyenne, 84% de participants ont évalué la qualité de scénarios *d'adéquat à excellent*, et 80% ont jugé le sentiment de présence *d'adéquat à excellent*. Ces soldats ont tout de même donné des retours suggérant l'amélioration du réalisme. Les auteurs ont répondu à cette suggestion en intégrant plus de personnages civils et des véhicules dans l'environnement, et en rajoutant un contrôleur permettant de naviguer dans l'environnement de manière plus réaliste.

En 2008, le système *Virtual Iraq* a été à nouveau utilisé pour traiter un vétéran OIF (*Operation Iraqi Freedom*) âgé de 29 ans et présentant les critères diagnostiques de TSPT (Gerardi, Rothbaum, Ressler, Heekin, & Rizzo, 2008). Au bout de quatre sessions de 90 minutes chacune, le patient présentait toujours les critères diagnostiques de TSPT, mais les résultats étaient tout de même statistiquement et cliniquement satisfaisants (diminution de 56%). Le patient a également rapporté des changements positifs sur plusieurs aspects de sa vie (concentration au travail, communication avec son épouse, moins d'évitement des amis).

Une autre étude de cas menée par Reger et Gahm (2008) consistait en six sessions de 90 minutes chacune sur un patient de la trentaine en service actif depuis neuf ans. Le patient a été témoin de plusieurs morts traumatiques pendant son service et présentait les symptômes de TSPT. En plus des séances de TERV exploitant l'outil *Virtual Iraq*, le traitement incluait la psychoéducation, la relaxation et l'exposition in vivo entre les sessions. Après les six sessions de traitement, une diminution des symptômes de 50% a été observée et le patient a regagné sa vie. Ces résultats ont été maintenus sept semaines après la dernière session de traitement.

En 2007, Wood et al. ont conduit une étude de cas avec un patient de 32 ans ayant été exposé à de sévères situations de combat pendant la guerre d'Iraq et présentant les symptômes de TSPT (Wood et al., 2006). Cette étude a été menée suivant le protocole expérimental de la TERV en dix sessions de quatre-vingts minutes chacune. Selon le rapport des auteurs, les résultats ne semblaient pas être très satisfaisants pour les scores des mesures utilisées dans la première moitié du traitement, mais le patient a présenté une amélioration à la fin et cela a été également perceptible au niveau des mesures physiologiques (conductance de la peau, température et rythme cardiaque).

Ces mêmes auteurs ont conduit des séances de TERV en 2008 avec six patients mâles de la marine américaine ayant aussi été exposés aux scènes de combat intense et présentant les symptômes de TSPT selon le DSM-IV (Wood et al., 2008). L'étude suivait le même protocole expérimental que la précédente. Pour l'ensemble des patients au terme des dix sessions et comparativement à l'évaluation pré-traitement, la mesure du niveau de dépression est passée de *modérée* à *légère* ; la mesure du niveau d'anxiété est passée de *sévère* à *modérée*. Il y a également eu une amélioration au niveau du diagnostic de

TSPT. Quatre des six patients ont été en rémission partielle du TSPT à la fin de l'étude et de bons changements ont autant été perçus sur les mesures physiologiques (conductance de la peau, température des doigts et rythme cardiaque).

D'autres auteurs, se sont penchés sur la surveillance physiologique favorisant la maîtrise de soi du patient et offrant au thérapeute la possibilité de contrôler les émotions du patient. Wood et al. ont rajouté cette composante d'évaluation dans une autre étude avec une jeune femme de 26 ans souffrant de TSPT chronique et plusieurs autres troubles comorbides à la suite de trois missions de combat en Iraq (Wood et al., 2009). Suivant le protocole expérimental de l'exposition prolongé, la patiente a suivi un traitement de TERV en vingt sessions de 90 minutes chacune. À la fin du traitement, la patiente ne présentait plus les critères diagnostiques des TSPT. Ces résultats ont été maintenus trois mois après le traitement. Selon les résultats de la surveillance physiologique, il y a eu de bons changements au niveau de la conductance de la peau et de la température cutanée périphérique, justifiant ainsi une habituation physiologique à ses expériences de combat. Finalement, la patiente a maintenu son service et entreprend retourner à l'école pour avoir des diplômes qui lui permettrait de devenir officière.

Rizzo et al. (2009) ont encore conduit une étude avec le système *Virtual Iraq*. Ceci a été fait à travers un *essai clinique ouvert*⁸ impliquant vingt patients (dix-neuf hommes et une femme) du service militaire diagnostiqués avec le TSPT et dont la moyenne d'âge

⁸ « Essai clinique au cours duquel aucun des participants (sujet, investigateur, chercheur responsable des analyses, etc.) n'est tenu dans l'ignorance du traitement administré » (OQLF, 2000b).

était de 28 ans. À la fin de l'étude, seize des vingt participants ne présentaient plus les critères diagnostiques du TSPT selon le DSM.

Tworus, et al. (2010) ont traité par la TERV et *l'entraînement comportemental*⁹ un soldat d'Iraq souffrant de TSPT. Le patient avait subi des expériences de guerre particulièrement traumatiques et aurait échappé à la mort trois fois. Son anxiété se manifestait par la perte de mémoire, la sensibilité, l'agressivité, les cauchemars et les visions de sa propre mort. Les traitements précédemment reçus par le patient (thérapies individuelles, de groupe, médication) n'avaient pas amélioré son état. Le traitement que ces auteurs ont infligé au patient consistait en vingt-deux sessions de trente à quarante-cinq minutes chacune. Au fil de ces sessions de TERV, le patient ressentait de l'ennui et le découragement, ce qui pour les auteurs marquait le fait que le patient était prêt à affronter la réalité. Ainsi, l'exposition *in virtuo* du patient a été suivit de trois sessions d'exposition *in vivo* durant lesquelles celui-ci devait assister à des séances de tir et en pratiquer. Même s'il a été pris de peur à la première session, cette peur a graduellement diminué au fil des trois sessions. Les différentes mesures utilisées ont montré une amélioration significative des symptômes du TSPT chez le patient entre l'admission et la fin du traitement (environ douze mois plus tard). Finalement, le patient a regagné sa vie et repris le service militaire.

Toujours en utilisant l'outil *Virtual Iraq*, Reger et al. ont fait une étude avec pour participants vingt-quatre soldats de service actif dont dix-huit présentaient les critères diagnostiques des TSPT et six ne remplissaient pas pleinement ces critères, mais avaient

⁹ « Behavioral Skills Training (BST) is a training package that utilizes instructions, modeling, rehearsal, and feedback in order to teach a new skill » (Dib & Sturmey, 2012).

été diagnostiqués d'autres troubles anxieux *NOS (Not Otherwise Specified - Sauf indication contraire)* (Reger et al., 2011). Le but de cette étude était de valider l'efficacité de la TERV chez cette population. Dans l'ensemble, les résultats d'en moyenne 7.4 sessions montrent une amélioration d'environ 22% sur les symptômes de TSPT. Il n'y a pas eu de différence significative entre ceux ne présentant pas pleinement les critères diagnostiques de TSPT et les autres. À l'évaluation post-traitement, neuf participants ne présentaient plus de diagnostic positif pour le TSPT.

McLay et al. (2012) ont utilisé le système *Virtual Iraq* pour conduire une autre étude avec les soldats en service actif. Ces derniers étaient diagnostiqués comme souffrant de TSPT chronique relatif aux opérations en Iraq ou Afghanistan et avaient été résistants aux autres formes de traitement précédemment entrepris. Des participants qui ont complété l'étude. 75% ont eu une amélioration supérieure à 50% et ne présentaient plus les critères diagnostiques de TSPT. Les 25% restant ont eu peu ou pas de changement. Il est à noter qu'il y a eu quarante-deux participants à l'admission et vingt-deux ont abandonné la thérapie. Ceux qui ont abandonné la thérapie étaient les plus jeunes. Les auteurs n'ont pas pu avoir des informations sur les raisons de l'abandon. Néanmoins, au vu de ces résultats et du fort taux d'abandon, la question sur l'adhésion et la motivation des patients pour un traitement basé sur la RV reste ouverte.

Kramer et al. (2013) ont fait une étude pour évaluer l'acceptabilité de la RV en tant que méthode d'évaluation des symptômes de TSPT et de traitement des vétérans OIF/OEF en service, n'ayant pas encore expérimenté la RV ni pour une évaluation ni pour une intervention clinique. Les participants étaient au nombre de quatorze, avec une moyenne d'âge de 33 ans et avaient servi en tant que militaire pendant dix années en

moyenne. Le processus d'évaluation consistait en une exposition de trois minutes dans un EV représentant la place du marché en Iraq, dans lequel le patient pouvait se déplacer. Les stimuli étaient progressivement intensifiés et entre autres constitués des sons de bombes, d'hélicoptère et d'activités de la foule. Pendant leur exposition au scénario virtuel, les participants ont eu des réactions physiologiques telles que la respiration rapide, la transpiration, l'augmentation du rythme cardiaque, traduit par un niveau de *Subjective Unit of Distress* allant de 28.4 au début à 67.9 à la fin du scénario. Cela leur a également permis, pendant l'interview, de décrire ce qu'ils ont vécu durant le déploiement, tout en comparant l'EV à leurs mémoires spécifiques. Un point frappant dans cette étude c'est la recommandation que les participants ont faite à la fin de leur expérience. Ils ont suggéré aux chercheurs de donner à l'utilisateur la possibilité d'avoir accès à un fusil dans l'EV et de pouvoir tirer afin d'améliorer le sentiment de présence.

En 2015, Rizzo et al. ont exploité à nouveau le système *Virtual Iraq* pour le traitement d'un jeune vétéran de la guerre d'Iraq âgé de 30 ans et ayant subi des traumatismes de guerre liés au Humvee. Sa thérapie lui a permis d'avoir non seulement des améliorations significatives personnelles, mais aussi une meilleure relation avec les situations publiques (Rizzo et al., 2015).

L'analyse de ces études effectuées avec le système *Virtual Iraq* présente des résultats plus ou moins satisfaisant de la TERV, mais permet néanmoins d'entrevoir un certain bonus de la RV pour la thérapie.

3.2.3 SYSTÈME BRAVEMIND-MST

Mozgai et al. (2020) ont rapporté le développement de l'extension BRAVEMIND-MST. Ils ont concentré le développement sur trois points : les environnements, l'état de l'avatar de l'utilisateur et les événements. Pour les environnements, ce système exploite l'un des environnements du système BRAVEMIND virtual Irak / Afghanistan et en ajoute un nouveau pour représenter une petite ville des États-Unis comprenant un bar extérieur, une ruelle, un terrain vide, un centre commercial, un extérieur de motel, une chambre / salle de bains de motel, un appartement, un bureau, une salle de bain pour femmes / hommes et un trajet en voiture. Des configurations importantes ont été faites sur les lumières afin de mieux représenter les ambiances des agressions sexuelles (la nuit ou dans des endroits sombres pendant la journée). Les états de l'avatar de l'utilisateur font référence à leur position et à leur orientation dans l'EV. Pour matérialiser cela, les auteurs ont ré-exploité les perspectives des utilisateurs des systèmes précédents (marcher ou s'asseoir dans un véhicule) et ont ajouté une nouvelle perspective, « s'allonger ». Comme avec le système BRAVEMIND pour le TSPT lié au combat, les événements ici concernent le déclenchement évolutif de stimuli par le clinicien via un panneau de contrôle séparé. Ces événements comprennent la respiration, la télévision, la douche, l'ouverture/fermeture de la porte, et la présence d'un agresseur. À notre connaissance, des études exploitant ce système n'ont pas encore été publiées.

3.2.4 SYSTÈME VIRTUAL WORLD TRADE CENTER (WTC)

Difede et Hoffman (2002) ont développé l'outil *Virtual WTC* pour traiter le TSPT chez les victimes de l'attaque terroriste du 11 septembre 2001. Cet outil comprend onze scènes anxiogènes qui peuvent être intégrées progressivement par le thérapeute durant la

thérapie. L'exposition commence par un simple vol en jet, suivi de survols des tours. Celles-ci s'accompagnent d'une explosion et d'un écrasement et conduisent finalement à l'effondrement des tours, avec les effets visuels et sonores correspondants. Cet outil utilise principalement des stimuli visuels et auditifs via un casque de RV équipé d'un système de suivi de la tête.

Ces auteurs ont effectué une première étude de cas avec une jeune femme de 26 ans ayant été témoin de la catastrophe parce qu'étant en face de la tour nord lorsque le premier avion l'a percutée (Difede & Hoffman, 2002). Elle présentait les symptômes de TSPT aigus et de dépression majeure selon le DSM-IV, et avait échoué à une thérapie d'exposition par imagination précédente. Le processus de traitement consistait en six sessions de TERV au cours desquelles les onze scènes anxiogènes de l'outil *Virtual WTC* lui étaient présentées graduellement. La patiente était peu favorable au traitement ("*I don't understand why I should do this. I am fine.*") et n'a initialement pas pu s'engager émotionnellement dans la thérapie (*Subjective Unit of Distress* à 0). Mais observant son irritabilité croissante, elle a finalement accepté d'essayer la TERV. À la fin de six sessions d'exposition *in virtuo*, la patiente ne présentait plus ni les critères diagnostiques des TSPT, ni de dépression majeure, ni même d'aucun autre trouble psychiatrique. Elle pouvait désormais remémorer la scène du 11 septembre 2001 sans frayeur et sans présenter les signes de TSPT.

Toujours en rapport avec le TSPT lié à l'attaque du WTC, Rizzo et al. (2015) ont rapporté le traitement *in virtuo* d'un sapeur-pompier de 49 ans qui présentait les symptômes du TSPT après la catastrophe du WTC. Ce patient culpabilisait notamment de s'être senti impuissant face à la dévastation et aux individus qui mourraient de façon

désastreuse. En plus du TSPT, le patient présentait d'autres troubles dépressifs comorbides. L'environnement utilisé pour son traitement représentait la ville de New York. Dans cet environnement pouvaient être rajoutés des stimuli visuels du paysage de Manhattan relatif à ce jour. Les stimuli auditifs quant à eux étaient basés sur des enregistrements des journaux nationaux de ce jour. Progressivement et selon la narration du patient, le thérapeute pouvait rajouter d'autres événements tels que des avions volant à travers les tours, ou même des avions percutant les tours nord et sud avec des sons d'explosion, des débris, des personnages virtuels en train de mourir et finalement l'effondrement de chaque tour. Au fil du traitement, les améliorations du patient étaient perceptibles autant dans sa vie familiale que professionnelle. Finalement, ce dernier ne présentait plus une grande réponse émotionnelle face aux stimuli. Il a fini par accepter la situation et a décidé de se concentrer sur le futur.

3.2.5 SYSTÈME POUR TRAITER LES VICTIMES DES GUERRES AFRICAINES

Gamito et al. (2007) ont développé un scénario d'embuscade virtuel pour réduire les symptômes du TSPT chez les vétérans des guerres africaines qui ont eu lieu entre 1961 et 1974. Cet outil utilise un écran translucide et un projecteur Sony XGA pour immerger le patient dans l'EV, ainsi que des sons environnementaux correspondant à la scène présentée sur le dispositif visuel. Des *shakers* Aura sont également utilisés pour ajouter des vibrations au siège du patient. L'EV se compose de deux chemins entourés de végétation et d'une colonne de soldats virtuels que le patient doit suivre. Les stimuli visuels, sonores et vibro-tactiles sont rendus de manière combinée et progressive. Ces stimuli comprennent les sons de coups de feu, de balles traçantes et de dynamite, de la

fumée noire, des particules résultant d'explosions ; et des bruits associés à l'évacuation des soldats blessés.

Les auteurs ont effectué une étude de cas pré expérimentale pour évaluer l'efficacité de cet outil à réduire les symptômes du TSPT chez un vétéran des guerres africaines (entre 1961 et 1974) âgé de 60 ans et rassemblant les critères diagnostiques de TSPT tels que définis par le DMS-IV (Gamito et al., 2007). L'élément clé de cette thérapie était la confrontation graduelle du patient à la peur intense. Malheureusement, le patient a abandonné au bout de sept sessions parce qu'il faisait des *flashbacks* et des cauchemars pendant la nuit. Les auteurs reportent tout de même qu'il s'est senti présent dans son environnement de thérapie.

3.2.6 LE SYSTÈME BUSWORLD

Josman et al. (2008) ont créé l'outil *BusWorld* pour traiter les survivants d'un attentat suicide dans un bus. Cette simulation est conçue pour permettre au thérapeute d'exposer le patient à des situations traumatiques d'une manière graduellement contrôlable. Quatre niveaux d'EV, développés pour être de plus en plus anxiogène, sont présentés : 1) une scène de rue calme en Israël ; 2) un bus approchant de l'arrêt de bus sans exploser ; 3) l'explosion du bus à l'arrêt de bus ; et 4) la séquence d'explosion avec des sons supplémentaires (explosions, hurlements de gens et sirènes de police). Cet outil intègre des stimuli visuels et auditifs à l'aide d'un casque de RV.

Pour mesurer la capacité de la simulation à générer de l'anxiété, ils l'ont testée chez trente adultes sains c'est-à-dire ne souffrant ni de TSPT ni d'autres maladies mentales et n'ayant jamais été victime ou témoin d'une attaque terroriste. Les scènes

d'exposition ont été soumises aux participants dans l'ordre 1, 2, 3, 4. Les résultats de cette étude, mesurés à partir des *Subjective Unit of Distress*, montrent que l'environnement *BusWorld* a pu susciter de l'anxiété chez les participants, et cette anxiété augmentait avec le niveau de la scène.

Une recherche portant sur l'exposition prolongée par imagination assistée par la RV en utilisant l'outil *BusWorld* a été conduite en 2010 (Freedman et al., 2010). Dans cette étude, un jeune citoyen israélien âgé de 29 ans était soumis à une TERV prolongée de dix sessions individuelles de quatre-vingts minutes chacune. À la suite d'une attaque de bulldozer terroriste, le participant présentait les symptômes de TSPT et de dépression avec des idées suicidaires, ainsi que quelques symptômes de trouble obsessionnel compulsif. Durant la thérapie, le patient avait des devoirs à faire à la maison qui consistaient en l'exposition *in vivo* à un bulldozer réel et en la réécoute des sessions enregistrées. Déjà à la sixième session le patient soulignait que la réécoute des sessions enregistrées ne générait plus du tout de l'anxiété. Les résultats du post-traitement et du suivi du sixième mois après le traitement ont montré que le patient s'est totalement remis du TSPT, de la dépression et du trouble obsessionnel compulsif. Le patient a même affirmé avoir eu des améliorations sur plusieurs aspects de sa vie. Il a aussi souligné avoir été capable de monter sans crainte dans le même bus que celui du jour de l'attaque :

“Every day I pass by the place of the attack at least twice. I think of what happened and continue on my way. This week, for the first time since the attack, I went on the same bus I took when the attack happened. I sat on the ‘unsafe’ side and said to myself ‘I’m doing this, and everything is all right.’”

3.2.7 SYSTÈME POUR TRAITER LES VICTIMES DES AGRESSIONS VIOLENTES

Cárdenas et De La Rosa (2012) ont développé un système de RV pour traiter le TSPT chez les victimes d'agression violente. Les appareils utilisés pour ce système comprennent un casque de RV, des écouteurs, des haut-parleurs et un ordinateur affichant l'EV. L'EV contient trois scènes: 1) les rues du Mexique (un lieu public dans lequel le patient peut se déplacer et qui contient des personnages virtuels d'apparence suspecte qui peuvent être placés près du patient); 2) un pont piétonnier que le patient doit traverser et sur lequel des personnes virtuelles peuvent être ajoutées; 3) un véhicule (taxi ou wagon) dans lequel le patient est confronté à un conducteur intimidant et à d'autres situations effrayantes (par exemple, personnes menaçantes, chemin bloqué ou changements de luminosité). Cet outil exploite les modalités visuelles et auditives.

Ces auteurs ont effectué une étude de cas avec un jeune participant âgé de 22 ans présentant les critères diagnostiques de TSPT après avoir subi une agression avec violence et menaces de mort (Cárdenas-López & De la Rosa-Gómez, 2011). Son trouble se manifestait non seulement par des cauchemars, mais aussi par des comportements d'évitement envers les personnes pas très connues, les étrangers, les milieux publics, les programmes violents de télévision et les discussions liées à la violence. Le programme de thérapie consistait en dix sessions de 90 minutes chacune dont l'objectif était d'exposer, à partir de l'outil développé, le patient aux mémoires de son trauma. À la fin de cette étude de cas, le patient a présenté une réduction des symptômes de TSPT de 51% et selon l'évaluation du DSM-IV, il ne présentait plus de critères diagnostiques du TSPT.

Ces mêmes auteurs ont poursuivi leurs recherches en effectuant une autre étude pilote avec dix participants (cinq femmes et cinq hommes), ayant une moyenne d'âge de 25.5 ans et ayant été victimes de violence criminelle, d'agression, d'enlèvement, ou ayant été témoins de ce type de violence en Ciudad Juarez (Cárdenas & De La Rosa, 2012). Les environnements virtuels utilisés étaient adaptés au contexte des participants et incluaient « *un scénario de rues de Ciudad Juarez, une scène de coups de feu, une scène d'agressions/vol, une serrure (point de contrôle de la police) et une salle d'enlèvement* » (Cárdenas & De La Rosa, 2012). La comparaison des données entre le début et la fin du traitement a révélé une diminution de 75% sur la moyenne des symptômes de TSPT. En plus du niveau de dépression et d'anxiété également réduites, les participants ne présentaient plus les critères diagnostiques de TSPT sur le DSM-IV.

3.2.8 SYSTÈME POUR TRAITER LES VICTIMES D'ACCIDENTS DE VÉHICULES A MOTEUR

Les victimes d'accidents de la route peuvent développer un ou plusieurs troubles psychiatriques, notamment la peur de conduire et le TSPT. Même si ce type de TSPT a été peu étudié, il ne faut pas le négliger, car plus de 800 000 nouveaux cas sont enregistrés chaque année (Blanchard & Hickling, 1997). L'une des premières études utilisant la RV pour traiter le TSPT lié aux accidents de la route a été menée par Beck et al. (2007). Les EV utilisées dans cette étude sont constituées de routes qui ressemblent à celles que les patients ont l'habitude de voir dans la vie réelle, avec quatre types de scènes disponibles : autoroute, urbaine, banlieue et rurale. Le patient regarde ces scènes à travers des lunettes stéréoscopiques. Selon la situation d'exposition spécifique, le patient peut vivre chaque séance en tant que passager ou conducteur, le thérapeute prenant l'autre rôle. Le dispositif utilisé est constitué d'une base de mouvement à six degrés de liberté, équipée d'un volant,

d'une pédale d'accélération et d'une pédale de frein. Des stimuli visuels, auditifs et tactiles sont utilisés pour modifier le niveau d'anxiété de la scène rendue. Au cours des séances, le superviseur est capable de modifier plusieurs paramètres, notamment la densité et le type de trafic, l'heure de la journée, les conditions météorologiques et les événements de conduite spécifiques.

La première étude utilisant la RV pour traiter un cas de ce type spécifique de TSPT a été menée en 2007. Beck et al. (2007) ont effectué une thérapie de dix sessions chez six patients victimes d'un accident de véhicule à moteur et remplissant pleinement les critères diagnostiques de TSPT selon le DSM-IV. Les deux premières sessions de 90 minutes chacune, étaient consacrées à la psychoéducation, à la relaxation et à l'édification des patients quant à leur trouble et au traitement dont ils allaient faire partie. À partir de la troisième session, le traitement consistait en soixante minutes d'exposition virtuelle proprement dite. À l'évaluation post-traitement, les patients ont présenté une réduction moyenne d'environ 43% des symptômes de TSPT. Dans les mesures utilisées, deux auto-rapports étaient destinés au sentiment de présence ressenti par les participants, et à leur satisfaction vis-à-vis du traitement reçu. Selon les résultats, les patients ont rapporté un haut niveau de satisfaction au traitement et un niveau de présence significativement élevé incluant le réalisme, la qualité des interfaces et l'implication/contrôle. Plusieurs limites furent observées pour cette étude. En particulier, huit patients avaient été recrutés et deux ont abandonné avant la cinquième session, l'un à cause de l'augmentation du stress en famille et l'autre à cause du travail.

Une phobie spécifique connexe au TSPT lié aux accidents de véhicules à moteur est la phobie de conduite. Quelques chercheurs ont exploré la TERV pour le traitement

de personnes souffrant de cette phobie. Ces études se sont beaucoup plus accentuées sur les éléments déterminants pour de meilleurs résultats, que sont selon les auteurs, la sensation d'immersion et le sentiment de présence dans l'EV de conduite. En 2003, Walshe et al. ont conduit une étude avec quatorze patients, sept ayant le diagnostic de phobie spécifique de conduite et les sept autres ayant le diagnostic de TSPT avec diagnostic clinique de phobie spécifique liée à la conduite ou de dépression (Walshe, Lewis, Kim, O'Sullivan, & Wiederhold, 2003). Dans cette étude, deux outils ont été utilisés : un simulateur de conduite virtuelle avec une scène de ville et une scène de tunnel, et un jeu vidéo de conduite matérialisant la conduite dans une ville avec densité de trafic variée et différentes conditions climatiques. Les quatorze participants ont été soumis à une session d'une heure de simulation de conduite pour évaluer si leurs sentiments d'immersion et de présence étaient adéquats pour la thérapie (*Subjective Unit of Distress* > 3 et/ou *Heart Rate* > 15 battements par minute). Les sept patients (50%) qui ont présenté les signes d'immersion et de présence ont été par la suite soumis à un traitement de 12 sessions d'exposition graduelle d'une heure chacune. Au fil de l'exposition, plusieurs niveaux de situations anxiogènes leur étaient présentés, notamment les doublages, les dérapages, et les situations accidentelles où ceux-ci perdraient le contrôle. À la fin de l'étude, les scores des variables mesurant le niveau de TSPT ont considérablement diminué. Les participants ont présenté une réduction significative au niveau de la détresse de voyage, d'évitement de voyage, et de stratégies de conduite inadaptées.

Ces mêmes auteurs ont évalué si en modifiant les facteurs externes à l'EV de conduite, les personnes souffrant de phobie de conduite pouvaient atteindre un degré d'immersion et de présence > 80% (*Subjective Unit of Distress* > 3 et/ou *Heart Rate* > 15 battements par minute) (Walshe, Lewis, O'Sullivan, & Kim, 2005). Pour cela, ils ont

exposé onze participants remplissant les critères de phobie de conduite (selon le DSM-IV) à une conduite virtuelle, cette fois-ci assis sur un vrai siège de véhicule. La scène virtuelle était projetée sur un écran géant visible à travers un pare-brise. Des sensations de vibration et un risque plus ou moins important d'accident étaient rajoutés. Dix participants (91 %) ont rempli les critères d'immersion et de présence, suggérant ainsi qu'un EV conçu en accord avec le paradigme utilisé de ce travail (ajouté d'éléments réels) serait *assez réaliste* pour susciter le sentiment d'immersion et de présence chez les personnes souffrant de phobie de conduite à la suite d'un accident de véhicule à moteur.

Trappey et al. (2020) ont proposé un système de réalité virtuelle pour aider les sujets ayant la phobie de conduite. L'outil a été construit pour une exposition graduelle à 07 niveaux dont la difficulté est liée au type d'environnement de conduite (pont, montagne, embouteillage), au temps de la journée et aux limitations de vitesse. Dans certains cas, le système impose également une vitesse minimale au sujet. Le système collecte dans une base de données, des données telles que l'accélération des roues et les vitesses de conduite au fil du temps, ainsi que des mesures physiologiques de l'utilisateur dont le rythme cardiaque, la conductance de la peau. Le but est d'analyser la force d'association linéaire entre les paramètres du système et les mesures physiologiques de l'utilisateur.

Les pré-expérimentations de cet outil ont été effectués avec trente-et-un sujets ayant une phobie de conduite relatifs aux paramètres de conduite introduit dans l'EV. Les participants ont été divisés en deux groupes : un groupe de faible anxiété et un autre de forte anxiété. Les résultats montrent que les situations du système affectent les données physiologiques de l'utilisateur dépendamment de son degré de phobie. De plus, les

auteurs ont remarqué une augmentation du niveau d'anxiété des participants avec les niveaux de difficulté des scénarios.

À la suite de ce prétest, les auteurs ont réajusté leur outil et ont effectué des thérapies effectives chez les personnes ayant une phobie de conduite (Trappey et al., 2021). Les ajustements concernaient notamment la modification et du nombre de niveaux d'exposition et de la difficulté des niveaux (désormais 04 niveaux au lieu de 7), et l'ajout niveau 0 devant permettre aux participants de s'habituer avec les équipements utilisés et les environnements virtuels. En effet, dans leur étude précédente, les auteurs ont souligné un niveau de stress élevé en début d'exposition, et cela a été justifié par l'éventualité d'un biais associé aux dispositifs. Les expérimentations ont été effectuées avec trente participants ayant une phobie de conduite telle qu'identifiée dans un questionnaire préliminaire de sélection. Le processus consistait en deux sessions espacées d'une semaine. Les résultats de cette étude montrent que la peur de conduite et l'auto-rapport au niveau du stress des participants ont considérablement diminué avec cet outil.

3.2.9 ÉTUDES COMPARANT LA TERV A D'AUTRES FORMES DE TRAITEMENT

Quelques auteurs ont comparé la TERV à d'autres formes de traitement.

Difede et al. (2006) se sont intéressés à un groupe de personnes dont les symptômes de TSPT étaient associés à l'attaque du WTC. Pour évaluer l'efficacité de la RV dans le traitement de ces personnes, ils ont effectué une étude comparative impliquant deux conditions : un groupe de TERV (neuf participants) et une liste d'attente (huit participants). Au bout de quatorze sessions de traitement, il y a eu une différence

significative de résultats entre les groupes, attestant ainsi de la plus-value de la TERV pour le traitement de civils et de travailleurs sociaux.

En 2007, une autre étude a été effectuée pour comparer un groupe de TERV (dix participants) à un groupe de contrôle (huit participants) pour le traitement de personnes victimes de l'attaque du WTC et présentant les critères diagnostiques de TSPT (Difede et al., 2007). Leur étude était basée sur les hypothèses selon lesquelles à la fin du traitement et au suivi de six mois les participants du groupe de TERV présenteraient une réduction statistiquement et cliniquement significative des symptômes des TSPT comparativement au groupe de contrôle, et très peu de participants du groupe TERV présenteraient encore le diagnostic de TSPT comparativement au groupe de contrôle. Les participants du groupe TERV avaient échoué à d'autres formes de traitements précédents l'étude. Cette étude suivait le processus expérimental de l'exposition prolongé et consistait en un nombre moyen de 7.5 sessions (entre six et treize sessions) de soixante-quinze minutes chacune. Les onze situations anxiogènes de l'outil *Virtual WTC* (voir section 3.2.4) étaient graduellement présentées aux patients pendant que ces derniers racontaient son trauma. À la fin du traitement, les hypothèses des auteurs ont été vérifiées, car le groupe TERV a eu une réduction des symptômes d'environ 36.5%, comparativement au groupe de contrôle qui est resté au niveau *sévère* de TSPT. Neuf des dix participants du groupe de TERV étaient qualifiés pour le suivi, et les bénéfices thérapeutiques ont été maintenus six mois après le traitement. Il faut noter que le groupe TERV a commencé avec treize participants, mais il y a eu trois abandons : un à cause de la distance, l'autre à cause d'un cancer et pour le dernier, les auteurs n'ont pas précisé la raison.

Rizzo et al. (2009) ont comparé les résultats d'un groupe de TERV d'une étude précédemment conduite utilisant le système *Virtual Iraq* (voir section 3.2.2), aux résultats d'un groupe de thérapie cognitivo-comportementale traditionnelle. Le groupe de TERV (cinq à onze sessions de traitement), était constitué de patients ayant échoué à la thérapie d'exposition par imagination, ou ceux désirant spécifiquement un traitement par RV. Le groupe de thérapie cognitivo-comportementale traditionnel (sept à quatorze sessions de traitement) était constitué de patients ne désirant pas participer à une forme individuelle de thérapie centrée sur le trauma. Le traitement était donc essentiellement la psychoéducation et l'approche par compétence pour ce groupe. Pour le groupe de TERV, 62% de patients (n = 13) ont présenté une réduction d'environ 28,09% de symptômes de TSPT, contre 28% de patients (n = 7) du groupe de thérapie cognitivo-comportementale traditionnel (réduction d'environ 10,8%).

Une des premières études randomisées¹⁰ avec évaluation à l'aveugle¹¹ a été conduite par Ready et al. (2010). Le but était d'examiner l'efficacité de la TERV comparativement à la thérapie centrée sur le présent¹². Cela a été réalisé avec onze vétérans de la guerre du Vietnam souffrant de TSPT. Les patients ont été aléatoirement attribués à l'une des deux conditions (TERV, n=6 ou thérapie centrée sur le présent, n=5). Cette étude était d'une durée de dix sessions de 90 minutes chacune, pour les deux conditions. Le traitement du groupe de TERV exploitait le système *Virtual Vietnam* (Hodges et al., 1999). La thérapie centrée sur le présent était essentiellement basée sur la

¹⁰ « **Randomized controlled trial:** A study in which people are allocated at random (by chance alone) to receive one of several clinical interventions » (Medicinenet, 2021b).

¹¹ « **Blind:** In a clinical trial, not to know the treatment given or received. The participant is not told whether they are in the experimental or control arm of the study. Also called masked » (Medicinenet, 2021a).

¹² « **Present-Centered Therapy** is a non-trauma focused treatment for PTSD. The primary mechanisms of change from a present centered perspective are grounded in (a) altering present maladaptive relation patterns/behaviors, (b) providing psycho-education regarding the impact of trauma on the client's life, and (c) teaching the use of problem solving strategies that focus on current issues » (APA, 2014).

psychoéducation, les problèmes de la vie courante du patient, les techniques de résolution des problèmes, et les discussions sur la façon d'affronter son trauma, sans toutefois se focaliser sur les événements traumatiques en soi. Les résultats ont été relevés au prétraitement, au post-traitement et au sixième mois après le traitement. Avec un abandon dans chaque condition, on peut dire que les deux groupes étaient équitables pour les évaluations. Bien que les patients du groupe de TERV semblaient avoir de meilleurs scores comparés à ceux du groupe de thérapie centrée sur le présent, les différences n'étaient pas aussi significatives entre les deux conditions. À la fin de cette étude, les auteurs ont souligné la taille réduite de la population d'étude, la difficulté de recrutement tant des civils que des vétérans souffrant de TSPT, et ont suggéré que les études futures puissent penser à de meilleurs moyens de recrutement et de maintien des patients.

Une autre étude, la première du genre, est celle de McLay et al. (2010) comparant la TERV à la thérapie d'exposition traditionnelle sur un théâtre de combat¹³. Pour cette étude, le fait d'être présent en Iraq a donné la possibilité à tous les participants de faire des exercices *in vivo*. Les participants étaient tous des membres de l'armée en service actif déployés en Iraq de février à septembre 2008 souffrant de TSPT chronique. Ils avaient pour la plupart été précédemment traités sans succès. Ils ont été répartis dans les deux conditions : six participants dans la condition de TERV et quatre dans la condition de thérapie d'exposition traditionnelle. La thérapie était d'une durée de six à douze semaines à raison d'une ou deux sessions par semaine. Le traitement administré dans le groupe de thérapie d'exposition traditionnelle consistait en une thérapie d'exposition par imagination durant les sessions et en exercices *in vivo* entre les sessions. L'autre groupe

¹³ « *Theater of war: the entire land, sea, and air area that is or may become involved directly in war operations* » (Merriam-Webster, n.d.).

suivait soit un protocole de TERV standard soit un protocole de TERV-CE (TERV avec Contrôle d'Éveil) intégrant notamment un contrôle physiologique (A. A. Rizzo et al., 2009). À la fin du traitement, les six patients du groupe de TERV ont tous montré des améliorations et cinq ne présentaient plus les critères diagnostiques de TSPT. La moyenne de pourcentage de changement était de 74% pour ces patients. Un patient est retourné chez lui avant la fin du traitement, car il avait terminé sa tournée. Tous les patients du groupe de thérapie d'exposition traditionnelle ne présentaient plus les critères diagnostiques de TSPT selon le DSM ; avec un patient de ce groupe ne présentant plus les symptômes de la maladie. Le minimum d'amélioration dans cette condition était de 50%. Selon cette étude, il n'y a pas eu une grande différence entre les résultats des deux conditions. La supériorité de la TERV comparativement à l'exposition traditionnelle reste donc à confirmer. Néanmoins, les auteurs suggèrent d'autres études pour pouvoir valider une éventuelle supériorité.

Gamito et al. (2010) ont mené une étude pour comparer la TERV à l'exposition par imagination et à une liste d'attente. Les neuf participants, présentant tous les critères diagnostiques de TSPT, étaient des anciens combattants de la série de guerres sur les colonies africaines entre 1963 et 1970. Ils ont été aléatoirement assignés aux trois conditions : n=4 dans le groupe de TERV, n=2 dans le groupe d'exposition par imagination, et n = 3 pour la liste d'attente. La thérapie consistait en douze sessions autant pour le groupe de TERV que pour le groupe d'exposition par imagination. L'environnement d'exposition du groupe de TERV était une végétation dans laquelle étaient graduellement rajoutés des stimuli anxiogènes. La TERV et l'exposition par imagination ont produit des résultats quasi identiques, mais cela reste néanmoins

encourageant pour de futures études d'exposition *in virtuo*. Aussi, 65% de participants ont attesté s'être senti « présent » dans l'EV d'exposition.

McLay et al. (2011) ont comparé la TERV graduelle au traitement usuel. Leur étude était basée sur l'hypothèse selon laquelle les patients du groupe de TERV auraient une meilleure amélioration ($\geq 30\%$ de réduction des symptômes) que ceux du groupe de traitement usuel. Les participants à cette étude étaient vingt membres de l'armée en service actif ayant été diagnostiqués comme souffrant de TSPT relatif au combat selon le *clinical administered ptsd scale* (un score ≥ 40) et d'autres instruments d'évaluation. Les participants ont été aléatoirement affectés aux deux groupes, 10 dans le groupe de TERV et 10 dans le groupe de traitement usuel. La thérapie administrée dans le groupe de traitement usuel était basée sur les techniques telles que l'exposition prolongée, la thérapie du processus cognitif, l'EMDR (Eye Movement Desensitization and Reprocessing)¹⁴, la thérapie de groupe et la gestion de la médication psychiatrique. Le processus thérapeutique s'est étendu sur dix semaines. Les participants pouvaient avoir deux sessions par semaine. Les nombres moyens de sessions effectuées à la fin étaient d'environ quatorze pour le groupe de traitement usuel et de onze (environ huit sessions d'exposition en RV pure) pour le groupe de TERV. Dans le groupe de traitement usuel, les patients recevaient juste un ou plusieurs traitements traditionnels ci-dessus mentionnés. Les résultats de cette étude montrent que sept participants (70%) du groupe de TERV ont eu une amélioration significative, contre seulement un participant (11.1%, car il y a eu un abandon) du groupe de traitement usuel.

¹⁴ « Le « Eye Movement Desensitization & Reprocessing (EMDR) » est une approche thérapeutique qui a fait l'objet de beaucoup de recherches et qui a prouvé son efficacité dans le traitement de traumatismes et plusieurs autres problèmes de santé mentale » (EMDR-Canada, 2021).

De la Rosa-Gómez et Cárdenas-López (2012) ont comparé, dans une étude randomisée, la TERV (n=10 participants) à la thérapie d'exposition par imagination (n=10 participants). Cette étude de douze sessions de quatre-vingt-dix minutes chacune a permis aux participants des deux groupes d'avoir les mêmes améliorations quant aux symptômes de TSPT, d'anxiété et de dépression.

Gahm et al. (2015) ont fait un essai clinique randomisé dont le but était d'effectuer une comparaison d'efficacité entre l'exposition prolongée, la TERV et une liste d'attente¹⁵ avec attention minimale. Vingt-trois soldats actifs retournant d'Iraq et d'Afghanistan, et présentant les critères diagnostiques de TSPT relatif au combat selon le *clinical administered ptsd scale*, ont été aléatoirement assignés à ces trois conditions : exposition prolongée (n = 8), TERV (n = 8), liste d'attente (n = 7). Cette étude était basée sur les hypothèses selon lesquelles les dix sessions de TERV réduiraient mieux l'ensemble des symptômes de TSPT (stigma, réponses physiologiques) comparativement à l'exposition prolongée et la liste d'attente et que les soldats présenteraient une meilleure adhésion au traitement de TERV qu'au traitement d'exposition prolongée. Le protocole expérimental pour l'exposition prolongée et la TERV consistait en dix sessions de 90 à cent-vingt minutes. Pour l'exposition prolongée, les deux premières sessions étaient dédiées aux discussions entre les participants et le thérapeute. Durant ces sessions, ils ont dressé une hiérarchie des situations anxiogènes pour les devoirs d'exposition in vivo. Les sessions entre la troisième et la neuvième consistaient en l'exposition prolongée par imagination durant lesquelles les soldats narraient leur trauma le plus possible au présent de l'indicatif et discutaient de leurs pensées et de leurs sentiments. Comme devoir à

¹⁵ « In psychotherapy research, a wait list control group is a group of participants who do not receive the experimental treatment, but who are put on a waiting list to receive the intervention after the active treatment group does » (Schimelpfening, 2018).

l'issue de ces sessions, les soldats devaient réécouter les enregistrements des séances et pratiquer des exercices in vivo. Les *Subjective Unit of Distress* étaient recueillies toutes les cinq minutes durant ces séances. La dernière session était consacrée à l'exposition par imagination finale, une revue de l'évolution du traitement, les discussions de l'exposition in vivo et des évaluations de suivi. Pour la TERV, deux environnements virtuels ont été utilisés : un environnement de ville et un environnement de convoi. Les environnements étaient paramétrables (temps de la journée (aube, jour, crépuscule, nuit), conditions climatique (ensoleillé ou tempête de sable), le point de vue relationnel (conducteur ou siège passager)) afin de permettre au thérapeute d'ajuster leur contenu en temps réel à l'expérience traumatique narrée par le soldat et ainsi de mieux la reconstruire. La paramétrisation incluait également la possibilité d'ajout d'autres stimuli audio (tir d'arme, voix, vents, ...) et audiovisuels (survol en hélicoptère). Le protocole expérimental pour la TERV était le même que pour l'exposition prolongée, juste une augmentation de l'imagination par une immersion dans les EV. Des mesures objectives d'évaluation des symptômes de TSPT ont été administrées au dépistage (pour déterminer l'éligibilité des participants), à la cinquième session et à la dixième session de traitement. D'autres mesures ont été utilisées pour déterminer le niveau physiologique et émotionnel des participants durant les sessions. Notamment les *Subjective Unit of Distress* pour évaluer le niveau d'angoisse et d'engagement dans la situation, et les mesures physiologiques telles que le rythme cardiaque, la conductance de la peau, les respirations, les données de température périphérique. Un questionnaire de satisfaction a également été administré pour déterminer le niveau global de satisfaction du patient vis-à-vis de son expérience. Même si les résultats de cette étude n'ont pas été rapportés dans les détails, les auteurs soulignent que l'exposition prolongée s'est révélée plus efficace que la TERV, ce qui contredit ainsi les hypothèses fixées au départ. Il faut tout de même noter que cette étude

est le premier essai randomisé contrôlé comparant l'exposition prolongée proprement dite et la TERV. Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires en ce sens pour effectuer une comparaison plus poussée entre ces deux méthodes de thérapie.

Reger et al. (2016) ont également mené un essai randomisé contrôlé comparant l'exposition prolongée traditionnelle, la TERV et une liste d'attente avec attention minimale. Les cent-soixante-deux soldats en service actif participants ont été aléatoirement repartis dans les trois conditions (n=51 pour l'exposition prolongée, n= 52 pour la TERV et n=53 pour la liste d'attente). Les hypothèses de cette recherche étaient les suivantes : 1) Les groupes de TERV et d'exposition prolongée présenteraient des réductions significatives sur les symptômes de TSPT comparativement à la liste d'attente ; 2) La TERV réduirait plus le TSPT que l'exposition prolongée ; 3) Il y aurait moins d'abandon, de stigma et plus de satisfaction dans le groupe TERV que dans le groupe d'exposition prolongée. Pour le groupe de TERV, l'outil *Virtual Iraq* a été utilisé. À la fin de cette étude, Les hypothèses de départ n'ont pas été totalement vérifiées. En effet, les résultats montrent que les groupes d'exposition prolongée et de TERV ont eu une réduction significative d'efficacité quasi identique sur les symptômes de TSPT comparativement à la liste d'attente. Néanmoins des évaluations aux troisième et sixième mois de suivi montrent une supériorité de l'exposition prolongée sur la TERV. Les auteurs soulignent aussi un taux d'abandon supérieur dans le groupe de TERV (44%) comparativement au groupe d'exposition prolongée (41%).

McLay et al. (2017) ont conduit, avec des thérapeutes formés à l'administration de la TERV une étude randomisée d'exposition prolongée de huit à douze sessions sur neuf semaines, à raison d'une ou deux séances de quatre-vingt-dix minutes par session,

avec un suivi au troisième mois post-traitement : les quatre-vingt-un participants impliqués dans l'étude présentaient les critères diagnostiques de TSPT. Les participants étaient aléatoirement répartis dans deux conditions : une condition de TERV (n = 43 participants) et une condition de thérapie d'exposition contrôlée (n=38 participants). La principale différence entre les deux conditions se situait au niveau du dispositif utilisé. En effet, la condition de TERV utilisait un casque de RV à travers lequel le patient était immergé dans des environnements de guerre (McLay et al., 2012), avec ajout de sensations de vibrations et d'odeurs pour maximiser l'immersion. La condition de thérapie d'exposition contrôlée exploitait un écran standard d'ordinateur pour présenter aux participants des images figées liées au contexte de guerre. Cette étude était randomisée avec évaluation aveugle. Le processus expérimental était celui de l'exposition prolongée : les deux premières sessions étaient dédiées à la compréhension du trauma des participants et à la description, à ces derniers, du processus expérimental. La troisième session était le début de l'exposition proprement dite. À partir de ce moment, les participants étaient exposés à un environnement simulé de guerre via un casque de RV (pour la condition de TERV) ou à des images figées sur un écran standard d'ordinateur (pour la condition de thérapie d'exposition contrôlée). Pendant l'exposition, chaque participant était invité à narrer son trauma et entretenait avec le thérapeute des discussions d'amélioration cognitive et de gestion des symptômes. Entre les sessions, les patients avaient des exercices d'exposition in vivo à faire. Les évaluations des symptômes de TSPT ont été effectuées avec le *clinical administered ptsd scale* avant, pendant et après le traitement. L'ensemble des résultats indique qu'il y a eu des améliorations au niveau des symptômes de TSPT dans les deux conditions après le traitement et un maintien lors du suivi du troisième mois après le traitement. Comme pour l'étude précédente, ces résultats n'indiquent aucune supériorité de la TERV comparativement à la thérapie d'exposition

contrôlée. De plus, les auteurs soulignent sept cas d'abandon dans le groupe de TERV avant l'évaluation post-traitement, contre 0 dans le groupe de thérapie d'exposition contrôlée. Ce qui signifie aussi que la TERV n'a pas forcément impliqué l'adhésion des participants. Après la première phase de traitement, certains participants présentant encore les critères diagnostiques des TSPT ont été transférés dans la condition opposée. Mais ce croisement n'a pas produit d'effet significatif pour l'une ou l'autre des deux conditions. Les auteurs soulignent enfin une possibilité davantage de la thérapie d'exposition contrôlée comparativement à l'exposition traditionnelle.

Tableau 1 : Résumé des outils de RV existant pour le traitement du TSPT

Référence	Outil de RV	Catégorie de dispositifs utilisés	Mode de mise à jour de l'EV	Modalités sensorielles exploitées	Activité motrice du sujet
(Rothbaum et al., 1999)	Virtual Vietnam.	<ul style="list-style-type: none"> - Un casque de RV, - Un woofer pour simuler les vibrations, - Des écouteurs, - Un joystick. 	Manuellement mis à jour par le thérapeute.	Visuelles, auditives, vibrotactiles.	Navigation à l'aide d'un joystick.
(Rizzo et al., 2006)	Virtual Iraq.	<ul style="list-style-type: none"> - Un gamepad, - Un HMD, - Une palette de d'odeurs, - Un transducteur de son pour simuler les vibrations. 	Manuellement mis à jour par le thérapeute.	Visuelles, auditives, olfactives, vibrotactiles.	Navigation à l'aide d'un gamepad.
(Rizzo et al., 2017)	BRAVEMIND.	<ul style="list-style-type: none"> - Les mêmes que pour le système Virtual Iraq. 	Manuellement mis à jour par le thérapeute.	Visuelles, auditives, olfactives, vibrotactiles.	Navigation à l'aide d'un gamepad.
(Mozgai et al., 2020)	BRAVEMIND-MST.	<ul style="list-style-type: none"> - Les mêmes que pour le système Virtual Iraq. 	Manuellement mis à jour par le thérapeute.	Visuelles, auditives.	Navigation à l'aide d'un gamepad.
(Difede & Hoffman, 2002)	Virtual World Trade Center.	<ul style="list-style-type: none"> - Un HMD. 	Manuellement mis à jour par le thérapeute.	Visuelles, auditives.	Non spécifié.
(Gamito et al., 2007)	Système pour le traitement des victimes de guerres africaines.	<ul style="list-style-type: none"> - Un écran translucide, - Un projecteur Sony XGA, - Des shakers Aura pour simuler les vibrations. 	Manuellement mis à jour par le thérapeute.	Visuelles, auditives et vibrotactiles.	Navigation .
(Josman et al., 2008)	BusWorld.	<ul style="list-style-type: none"> - Un HMD. 	Manuellement mis à jour par le thérapeute.	Visuelles et auditives	Non spécifié.
(Cárdenas & De La Rosa, 2012)	Système pour le traitement de victimes d'agressions violentes.	<ul style="list-style-type: none"> - Un HMD - Un casque - Des haut-parleurs - Un ordinateur pour afficher l'EV. 	Manuellement mis à jour par le thérapeute.	Visuelles et auditives	Navigation .
(Beck et al., 2007)	Système pour le traitement des victimes d'accidents de véhicules à moteur.	<ul style="list-style-type: none"> - Des lunettes stéréoscopiques - Une base de mouvement à 06 degrés de liberté équipé d'un volant de course et des pédales d'accélération et de frein. 	Manuellement mis à jour par le thérapeute.	Visuelles, auditives, tactiles et haptiques.	Conduite d'un véhicule virtuel.

3.3 DISCUSSION DE LA LITTÉRATURE ET POSITIONNEMENT DE NOS TRAVAUX

En tout premier lieu, notons que l'analyse globale de cette revue de la littérature nous permet de voir que les technologies de la RV seraient intéressantes pour le traitement du TSPT. Cependant, la plupart des études semblent s'être focalisées sur l'utilisation de la RV juste à des fins d'amélioration de la capacité du patient à se remémorer de son trauma comme dans le cadre d'une thérapie d'exposition par imagination (Friedman, 2007; Gahm et al., 2015; Josman et al., 2008; Kramer et al., 2013; Tworus et al., 2010; Walshe et al., 2005; Walshe et al., 2003). Certains auteurs ont même trouvé très intéressant que le patient imagine une suite logique à des scènes alors que celles-ci n'étaient pas encore affichées à l'écran (McLay et al., 2011; Tworus et al., 2010). On peut aussi noter des assertions des auteurs tels que :

“VRE (Virtual Reality Exposure Therapy) is similar to traditional PE (Prolonged Exposure), with the largest difference being that aspects of the trauma are illustrated for the patient within a VR(Virtual Reality) simulator while the patient narrates the trauma experience.”(McLay et al., 2010).

Une telle assertion souligne que la RV n'est utilisée que pour améliorer la narration du patient lors de l'exposition par imagination. Les sous-sections suivantes relatent plusieurs points qui ont retenu notre attention au travers de cette étude de la littérature.

3.3.1 ON N'OBSERVE PAS UNE SUPÉRIORITÉ DES APPROCHES DE TRAITEMENTS BASÉES SUR LA RV

Les études comparant la TERV à l'exposition prolongée traditionnelle et à d'autres conditions de traitement ont donné un verdict plutôt embarrassant quant à la supériorité de la TERV. Assurément, la TERV est supérieure aux conditions de contrôle (Difede et al., 2007; Difede et al., 2006; Gahm et al., 2015; Gamito et al., 2010; McLay

et al., 2017). Cependant, même si elle s'est révélée plus efficace que d'autres formes de traitement dans certains cas (Rizzo et al., 2009), dans d'autres, il n'y a pas eu de différences significatives dans les résultats (de la Rosa Gómez & López, 2012; Gamito et al., 2010; McLay et al., 2010; Ready et al., 2010). De plus, deux études comparatives ont rapporté la supériorité de l'exposition prolongée traditionnelle sur la TERV (Gahm et al., 2015; Reger et al., 2016).

3.3.2 ON OBSERVE PLUSIEURS CAS D'ABANDON DANS LES ÉTUDES EXPLOITANT LA RV

De cette revue de la littérature, on peut noter des taux d'abandon plus élevés dans les groupes de TERV que dans d'autres conditions, autant pour les études comparatives que pour les études à un seul groupe. Dans leur étude, McLay et al. (2017) soulignent un abandon de sept participants dans le groupe de TERV, avant l'évaluation post-traitement, contre aucun dans le groupe de thérapie d'exposition contrôlée. Dans une autre étude de ces mêmes auteurs, sur les quarante-deux participants qui ont été recrutés au début, il n'y a eu que vingt qui ont terminé le programme (McLay et al., 2012). Le seul facteur que les auteurs précisent est que ceux qui ont abandonnés étaient plus jeunes que ceux qui ont terminé l'étude. Reger et al. soulignent aussi un taux d'abandon supérieur dans le groupe de TERV (44%) comparativement au groupe d'exposition prolongée (41%) (Reger et al., 2016). Au vu de tout ceci, on peut juste comprendre que la TERV, telle qu'exploitée dans les études actuelles, n'implique pas forcément l'adhésion du participant au traitement et donc ne limite pas le taux d'abandon. Cela peut être dû à deux facteurs : 1) l'exposition directe qui se révèle trop anxiogène pour le participant (Gamito et al., 2007; Gamito et al., 2010; Ready et al., 2006) ; 2) Un certain niveau d'ennui perçu dans l'EV de thérapie (Tworus et al., 2010). Dans cette dernière étude, les auteurs précisent que le patient a

ressenti de l'ennui au fil du traitement *in virtuo* et a été soumis à un traitement *in vivo* pour résoudre cela. Bien évidemment pour certains cas de TSPT, on peut reproduire partiellement la situation traumatique dans la vraie vie, mais dommage que cela ne puisse être possible pour tous les cas à cause de plusieurs facteurs tels que la nature de la situation et le niveau d'anxiété du patient. S'il est impossible de reproduire la situation *in vivo*, on ne pourra baser l'intégralité du traitement que sur les sessions *in virtuo*, ce qui demanderait la prise en compte de bons paramètres pour la conception d'environnements virtuels favorisant l'adhésion et l'engagement des patients et leur permettant de s'y investir comme s'ils étaient dans la vraie vie.

3.3.3 LES PATIENTS NE SEMBLENT PAS ÊTRE PLEINEMENT SATISFAITS DES OUTILS DE TRAITEMENT PAR LA RV

La thérapie d'exposition *in virtuo* étant relativement jeune, des auteurs ont pris l'initiative de faire certaines expériences avec des personnes saines en vue d'évaluer la qualité de l'outil de thérapie et sa capacité à stimuler de l'anxiété chez le patient (Josman et al., 2008; Kramer et al., 2013; Reger et al., 2009). Après essai, les suggestions rapportées par les sujets concernaient principalement l'amélioration du réalisme et d'activité (possibilités offertes au patient).

3.3.4 LES USAGERS DEMANDENT DES AMÉLIORATIONS DU RÉALISME

La question du manque de réalisme a été soulevée dans l'étude de Reger et al. (2009). Pour répondre à cette suggestion, les auteurs se sont contentés d'ajouter plus de personnages et de véhicules dans l'environnement. Cependant, à une telle suggestion, nous pensons que l'augmentation du niveau de réalisme pourrait être faite en se focalisant sur l'utilisateur final, comme le suggère le modèle de conception centrée sur l'utilisateur

qu'ils ont utilisé. Notamment, l'accent aurait pu être mis sur le développement des composantes pour augmenter le niveau de contrôle du sujet à travers son action et son interaction avec l'EV de thérapie. Le participant agissant comme dans la vraie vie, expérimenterait alors un fort sentiment à la fois de réalisme perçu, et probablement de présence dans son environnement d'exposition.

3.3.5 LES USAGERS SOUHAITENT AVOIR PLUS DE POSSIBILITÉS D'INTERACTION

Pour ce qui est de la suggestion concernant l'interaction (Kramer et al., 2013), les sujets ayant effectué les tests proposaient qu'il soit possible pour le patient d'avoir un fusil et de pouvoir tirer en cas de nécessité. De là, on peut noter que dans son EV de thérapie, le sujet peut avoir le profond désir d'agir, soit pour se défendre, soit pour revivre son trauma virtuel autrement, et pourquoi pas rectifier les erreurs qu'il croit avoir commises durant la situation traumatique réelle (ceci serait par exemple intéressant pour ceux qui ont un fort sentiment de culpabilité). Suivant ce même ordre d'idées, un point marquant qui peut être relevé dans l'étude de cas de Gamito et al. (2007) est l'observation faite par les auteurs sur la réaction du patient face à l'augmentation de l'intensité des stimuli après la deuxième session :

« Where cue intensity was raised, the participant assumed a combat position (arms and hands in a position such as if a firearm was being carried), trying to find the enemy within the scenario. When triggers such as ambush and mine deflagration occurred, the patient tried to take cover and started simulating firing. The subject maintained this behaviour pattern throughout the following sessions » (Gamito et al., 2007).

Plutôt que de se laisser emporter par l'anxiété, le patient a réfléchi et a pris la décision d'interagir sans contrainte aucune du thérapeute. La profondeur de ce comportement nous laisse entrevoir à l'évidence que le patient voudrait certainement revivre la scène

traumatique virtuelle autrement à travers l'autodéfense. Ce serait ainsi dans l'action et par l'interaction que le sujet perçoit son auto-efficacité et essaie de vaincre ses peurs.

3.3.6 ON OBSERVE UNE DIFFICULTÉ DE RECRUTEMENT

Un autre problème criant justifiant le manque d'études randomisées concerne la difficulté de recrutement. Ready et al. (2010) soulignent que la difficulté de recrutement peut être dû au fait que la plupart des personnes souffrant de TSPT sont d'une génération qui n'a pas forcément été familiarisée avec les technologies. Cependant dans leur étude comparative, McLay et al. (2012) précisent que plus de la moitié des participants, les plus jeunes, ont abandonné le traitement. Même si plus de détails ne sont pas donnés sur cette population pour nous permettre de situer leur génération, on n'assignerait pas totalement l'adhésion au traitement à l'âge des participants. Il est ainsi important de trouver de bons moyens pour favoriser le recrutement, l'adhésion au traitement et limiter les taux d'abandon durant la thérapie.

3.4 CONCLUSION

Finalement, comme tous ces chercheurs qui se sont intéressés à l'utilisation de la TERV pour le traitement du TSPT, nous pensons que la RV peut avoir un franc succès dans ce domaine. Néanmoins, si elle n'est pas exploitée au niveau des bénéfices qu'elle offre, elle risque ne pas être appréciée à sa juste valeur. Entre les cas d'abandon, de non-diminution significative des symptômes de TSPT et d'augmentation de ces symptômes chez certains patients tels qu'observés dans cette revue de la littérature, il serait important de chercher les composantes principales qui feraient en sorte que la RV s'allie bien à l'apprentissage qui est le principal mécanisme derrière l'efficacité de l'exposition

(Craske, Treanor, Conway, Zbozinek, & Vervliet, 2014). Le fait d'exposer un patient dans un EV où il n'est qu'un observateur passif n'est pas très différent d'une simple présentation d'images ou de vidéos. D'ailleurs, l'étude comparant la TERV à la thérapie d'exposition contrôlée a montré que présenter des médias au sujet via un écran d'ordinateur était aussi efficace que les lui présenter via un casque 3D. Cela pourrait certes améliorer les capacités d'imagination du patient, mais ce dernier semble plutôt « subir » le traitement. Nous pensons que si le patient avait la possibilité d'interagir et de décider du cours des choses dans son environnement d'exposition, cela pourrait être encore plus efficace. Il est certes vrai que le patient se trouve dans un environnement sécuritaire, mais face à tous ces stimuli anxiogènes, il peut ne pas toujours avoir le discernement nécessaire pour intégrer que ce ne sont que des objets numériquement conçus. Ceci est d'autant plus simple à comprendre que la peur du patient s'active rapidement juste en voyant ces objets, surtout dans le cas des expositions directes, comme nous l'avons constaté dans la plupart des études de notre revue de la littérature. Alors, on se poserait inéluctablement cette question : *qu'est-ce que le patient peut faire pour se défendre face à tous ces stimuli effrayants qui lui sont présentés ?* Premièrement, nous pensons qu'il est important que l'exposition du patient soit indirecte afin d'éviter de le traumatiser à nouveau. Deuxièmement, peu importe la nature du TSPT, les EV devraient être conçus pour permettre au patient d'interagir, car, à l'origine, c'est un monde à l'échelle humaine qui est proposé au patient pour son exposition et on ne saurait dissocier l'être du monde. Ceci est d'autant plus vrai lorsque l'on considère l'essence même de la RV qui voudrait la contribution active de l'utilisateur au flot des événements qui se déroulent dans l'EV.

PARTIE 2

PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE

Résumé : Dans cette partie, nous établissons la problématique de nos travaux de recherche en mettant l'accent sur les manquements soulignés dans la discussion de la revue de la littérature précédente. Nous présentons également l'approche méthodologique qui nous a permis de répondre à cette problématique. La première étape de notre méthodologie a consisté à décrire les approches théoriques qui permettraient de centrer la thérapie sur l'action et les interactions dynamiques et évolutives du sujet avec l'environnement virtuel. Il s'en est suivi une implémentation de ces propositions dans un simulateur de conduite de camion en réalité virtuelle pour le traitement du trouble de stress post-traumatique chez les camionneurs. Nous avons conçu et développé le simulateur suivant le modèle de référence de la réalité virtuelle qui met l'accent sur les caractéristiques d'interaction, d'immersion et de présence. Ensuite, nous avons rajouté un module d'ajustement dynamique qui devait permettre d'avoir un simulateur autoadaptatif à l'état émotionnel du patient. Cet état émotionnel est évalué selon son rythme cardiaque qui est récupéré par un vêtement intelligent (l'Hexoskin) et transmis en temps réel au simulateur à l'aide d'un module développé à cet effet.

CHAPITRE 4

PROBLÉMATIQUE

De notre analyse de la littérature, nous pouvons ressortir que les deux ingrédients clés de la Réalité Virtuelle (RV) qui tendent à être partiellement exploités sont l'immersion et la présence. En effet, le principe des études actuelles repose sur l'idée selon laquelle un patient ayant atteint un haut niveau de présence dans l'environnement virtuel a par la même occasion un haut niveau d'anxiété (Michaud, Bouchard, Dumoulin, Zhong, & Renaud, 2004) physiologiquement manifesté par l'augmentation du rythme cardiaque et la transpiration (Walshe et al., 2005; Walshe et al., 2003). De plus, certaines études ont souligné qu'un niveau optimal de présence conduirait à un accès réussi à la mémoire de peur du patient (Difede et al., 2007; Walshe et al., 2005; Walshe et al., 2003), ce qui est la première condition de la théorie du traitement émotionnel pour la réussite de la thérapie (Foa & Kozak, 1986). Cependant, pour favoriser ce sentiment de présence, ces chercheurs ont focalisé leurs efforts sur la stimulation sensorielle au détriment de l'interaction. Déjà, on ne saurait faire abstraction de la présence indéniable de l'interaction dans notre vie de tous les jours. Elle nous permet d'autant plus d'évoluer dans ce monde que de le transformer en agissant sur lui. De même, la différence de l'utilisation d'un simple ordinateur avec une vue de photos ou vidéos 3D, un monde virtuel immersif en RV se veut un monde perçu pseudo-naturellement par l'utilisateur tant à travers une stimulation sensorielle qu'une activité motrice. L'utilisateur ne doit pas seulement subir le monde dans lequel il est plongé à travers la sollicitation de plusieurs modalités sensorielles, il doit aussi pouvoir s'y sentir comme une entité vivante, et donc pouvoir y agir à l'intérieur soit pour modifier l'information sensorielle qu'il reçoit de

l'environnement, soit pour modifier le contenu propre de l'environnement afin de mieux l'apprécier.

Il a été clairement établi que la thérapie par exposition opère suivant un mécanisme d'apprentissage (Craske et al., 2008; Craske et al., 2014; Powers et al., 2007). L'apprentissage a évolué à travers plusieurs modèles et les postulats actuels sont qu'un meilleur apprentissage est basé sur la participation active du sujet durant le processus. Or, à la lumière de la revue de la littérature et de la discussion que nous avons effectuée, il en ressort que malgré les différents potentiels de la RV qui pourraient permettre d'impliquer activement le sujet lors de la thérapie d'exposition par la réalité virtuelle, l'exposition reste un apprentissage passif pour celui-ci. Alors, le problème à résoudre est le suivant: comment concevoir et développer l'application de RV pour favoriser la construction efficace de nouvelles habiletés du sujet dans son environnement virtuel de thérapie? Pour mieux répondre à cette question, nous l'avons développée en plusieurs sous-questions:

- Quels sont les buts recherchés par l'utilisateur durant la thérapie d'exposition par la réalité virtuelle?
- Quels sont les moyens que le sujet voudrait pouvoir mettre en œuvre pour atteindre ces buts?
- Quels sont les moyens disponibles au niveau de l'application de RV ?
- L'application de RV est-elle capable d'aider et d'assister l'utilisateur dans l'accomplissement de ses tâches vers l'atteinte de ces buts ?

Les réponses à ces différentes questions constituent le socle de nos propositions de recherche.

CHAPITRE 5

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

5.1 INTRODUCTION

Pour répondre à la problématique énoncée dans le chapitre précédent, nous avons proposé de nouvelles approches permettant d'exploiter adéquatement l'énorme potentiel des technologies de la Réalité Virtuelle (RV) dans le traitement du Trouble de Stress Post-Traumatique (TSPT). Nous nous sommes appuyés sur deux fondements principaux :

- 1) L'apprentissage comme mécanisme phare de la Thérapie d'Exposition par la Réalité Virtuelle (TERV);
- 2) La mise en application des caractéristiques principales de la RV dans la TERV.

5.2 ENVISAGER LA THÉRAPIE TERV COMME UN JEU SÉRIEUX

Les fondements précédents nous ont conduits à la possibilité d'envisager la thérapie comme un Jeu Sérieux (Serious Game en anglais, en abrégé SG)¹⁶. En effet, les SG permettent d'appliquer efficacement le modèle centré-apprenant de l'apprentissage (Checa & Bustillo, 2020). Ils sont constitués d'activités permettant aux utilisateurs d'apprendre en se divertissant. De ce fait ils sont composés d'une finalité utilitaire à laquelle est rattachée une finalité ludique à travers un processus de gamification (Djaouti, Alvarez, & Jessel, 2011). En tant que jeu (jeu vidéo dans notre contexte), ils respectent certains standards, dont la création d'un monde du jeu dans lequel l'utilisateur sera incarné à travers son avatar, ce qui fera de lui une entité vivante qui participe au

¹⁶ Nous utiliserons le sigle SG pour Serious Game dans la suite du document

déroulement des évènements de ce monde. Ainsi, en s'alliant aux technologies de la RV, les SG constituent un moyen efficace et naturel permettant aux apprenants d'atteindre un haut niveau d'interaction avec le système (Checa & Bustillo, 2020).

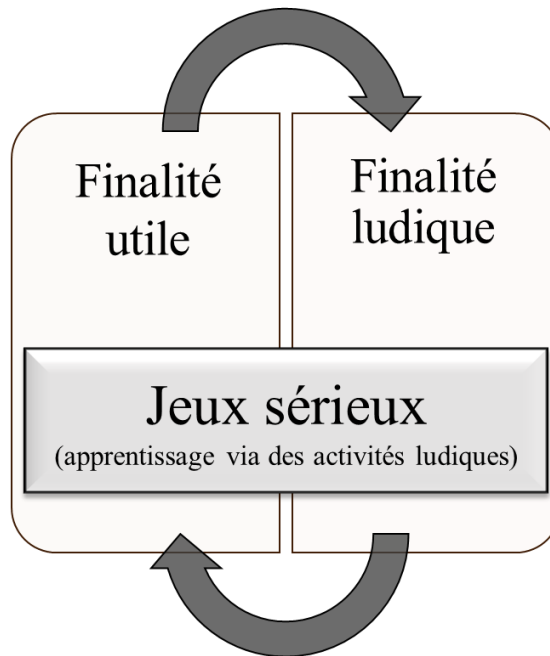


Figure 2 : Principe des jeux sérieux

5.3 ADAPTER LA TERV AU PROFIL DE CHAQUE PATIENT : L'AJUSTEMENT DYNAMIQUE DE LA DIFFICULTÉ

Dans notre thèse, nous nous sommes particulièrement intéressés au fait que les joueurs de SG ont des objectifs de jeu dont l'atteinte passe par la résolution d'un ou plusieurs défis dans certains contextes spécifiques. Étant donné que tous les utilisateurs d'un même SG n'ont pas les mêmes habiletés d'apprentissage, ils peuvent se sentir ennuyés ou frustrés par un jeu selon qu'il soit trop facile ou trop difficile pour eux. Il apparaît que plus la situation sera adaptée au profil du joueur, plus il sera efficace dans le jeu. Nous trouvons cette approche dans l'Ajustement Dynamique de la Difficulté (ADD).

Pour maintenir un équilibre approprié entre les compétences du joueur et le niveau de difficulté du *gameplay*, certains SG proposent des niveaux de difficulté statiques que le joueur peut sélectionner avant d'entrer dans le *gameplay*. Cependant, cela peut ne pas être assez significatif pour le joueur, car il peut ne pas savoir exactement à quel niveau de défi s'attendre lors du choix d'un niveau de difficulté. Pour résoudre ce problème, de nombreuses études ont exploré la possibilité d'adapter les défis du jeu en fonction des caractéristiques personnelles de chaque joueur (Delmas, Champagnat, & Augeraud, 2007; Hunicke & Chapman, 2004; Spronck, Ponsen, Sprinkhuizen-Kuyper, & Postma, 2006). Si plusieurs techniques se sont focalisées sur les performances du joueur dans le jeu, d'autres ont étudié le côté émotionnel de ces derniers, soit en faisant un suivi des mouvements du visage du joueur en temps réel, soit en utilisant ses paramètres physiologiques (Da Silva, Courboulay, Prigent, & Estrailier, 2008). Ces dernières méthodes sont tout à fait intéressantes lorsqu'on a à faire aux jeux sérieux destinés au traitement des troubles mentaux, car les paramètres physiologiques constituent de bons indicateurs pour l'évaluation de l'état émotionnel des patients (Wood et al., 2009).

5.4 PARAMÈTRE D'AJUSTEMENT À CONSIDÉRER

Les réponses physiologiques impliquées dans les réponses de stress associées au TSPT incluent la réactivité du Rythme Cardiaque (RC) (Bryant, 2016). Ces réponses aux stimuli anxiogènes encapsulent les symptômes de TSPT dans l'hyperéveil et le « revécu » (intrusions, flashbacks, ...) (Blanchard et al., 1996). Cela découle de l'activation du réseau de peur du sujet lorsqu'il est confronté à des stimuli le rappelant son trauma, et se traduit par l'augmentation du RC (Blanchard et al., 1996). Lors des traitements le RC du patient est généralement évalué par intervalle de temps égaux durant les sessions, et les

conclusions sont prises par rapport à l'atténuation ou non de la réactivité cardiaque face à la même situation anxiogène (Freyth, Elsesser, Lohrmann, & Sartory, 2010; Rothbaum et al., 2004; Walshe et al., 2005; Walshe et al., 2003; Wood et al., 2009). Pour cela, il a été intéressant pour nous de concevoir le dispositif de TERV comme un SG qui inclue un système d'ADD permettant à la simulation de s'adapter à l'état émotionnel du patient défini par son rythme cardiaque récupéré en temps réel.

5.5 ÉTAPE DE NOTRE MÉTHODOLOGIE

Les considérations précédentes nous ont permis d'adopter une méthodologie de recherche en quatre étapes principales:

Étape 1 : La proposition d'une approche de traitement basée sur le modèle actif de l'apprentissage (voir CHAPITRE 6)

Dans cette approche, nous avons décrit comment envisager la TERV en mettant en avant l'action du sujet qui est l'élément le plus élémentaire de l'interaction. Nous avons également axé la proposition sur un système de *gamification* qui allie les mécaniques de jeu et les mécaniques d'apprentissage. Nous avons baptisé cette approche *Action-Centered Exposure Therapy* (en français : Thérapie d'Exposition Centrée sur l'Action) (Kamkuimo K., Fossaert, Girard, & Menelas, 2018).

Étape 2 : La proposition d'un modèle éactif consistant à prolonger l'approche précédente vers une dynamique d'évolution adaptative et concomitante du sujet et de l'environnement durant la TERV (voir CHAPITRE 7)

Sachant qu'il y a une modification conjointe et dynamique du sujet et de l'environnement dans le processus d'interactivité, nous avons étendu l'approche précédente à la

perspective de l'énaction. Un apprentissage suivant l'énaction insiste sur une transformation concomitante du sujet et de l'environnement pendant le processus.

Étape 3 : La conception et l'implémentation de ces propositions théoriques (voir CHAPITRE 8 et CHAPITRE 9)

En se basant sur les fondements théoriques expliqués dans nos deux approches précédentes, nous avons proposé un outil de TERV dynamique et auto-adaptatif. Ce système fonctionne sur la base d'un algorithme qui récupère en temps réel le rythme cardiaque du sujet et l'utilise comme paramètre d'ajustement pour lui proposer un environnement approprié selon son état émotionnel courant durant le traitement.

Étape 4 : L'évaluation de l'utilisabilité de l'outil (voir CHAPITRE 10)

Pour évaluer l'utilisabilité de l'outil développé, nous avons utilisé comme critères l'ensemble d'heuristiques permettant d'évaluer une application de RV. À cela, nous avons combiné les spécificités d'une évaluation cognitive pas à pas, d'une évaluation graphique, d'une évaluation des performances physiques et d'une évaluation de l'interface utilisateur.

CHAPITRE 6

THÉRAPIE D'EXPOSITION CENTRÉE SUR L'ACTION (ACET)

Résumé : Les recherches suggèrent que la thérapie par exposition pour le traitement du trouble de stress post-traumatique repose principalement sur un processus d'apprentissage. Sur la base des théories de l'apprentissage, il semble qu'une exposition systématique passive à des stimuli traumatiques ne devrait pas être la meilleure option pour le traitement de ce trouble. Nous émettons l'hypothèse qu'un apprentissage actif de stratégies d'adaptation plus sûres et plus saines, combiné à une exposition systématique, devrait être plus efficace pour réduire la détresse psychologique associée au trauma. Dans ce chapitre, nous décrivons les fondements théoriques d'une nouvelle approche centrée sur l'action et l'activité du patient dans son environnement d'exposition. Elle se fonde sur les théories béhavioristes, cognitivistes et constructivistes de l'apprentissage. Elle exploite aussi les avantages des technologies de la réalité virtuelle et les mécanismes d'apprentissage des jeux sérieux pour permettre au patient d'acquérir de nouvelles associations saines tout en favorisant son autonomisation. Nous avons nommé cette approche *Action-Centered Exposure Therapy (ACET)*. Nous clôturons le chapitre par la présentation d'un cas empirique qui soutiendrait l'ACET.

6.1 INTRODUCTION

Nous avons souligné plus tôt dans cette thèse que la thérapie par exposition repose sur le principe selon lequel les peurs pourraient être à la fois conditionnées et éteintes par des expériences d'apprentissage (Lancaster, Teeters, Gros, & Back, 2016). Comme précisé dans Ertmer et Newby (1993): « *To be successful, meaningful and lasting, learning must include all three of these crucial factors: activity (practice), concept (knowledge) and culture (context)* » (Brown, Collins, & Duguid, 1989). Nous supposons qu'un apprentissage actif de stratégies d'adaptation plus sûres et plus saines, combiné à une exposition systématique, devrait être plus efficace pour réduire la détresse psychologique associée au Trouble de Stress Post-Traumatique (TSPT) (Menelas, Haidon, Ecrepont, & Girard, 2018). Cette vision de l'apprentissage actif pourrait

facilement s'intégrer dans un contexte *in-virtuo* car les technologies de la Réalité Virtuelle (RV) offrent un moyen d'exploiter la plupart des capacités sensori-motrices de l'utilisateur (Menelas, Picinali, Bourdot, & Katz, 2014) à travers l'interactivité (Bouchard, Côté, & Richard, 2007). Une telle idée peut être renforcée par l'exploitation des jeux sérieux (SG pour *Serious Games*) qui permettront de créer un environnement ayant le potentiel de motiver le joueur et de l'engager à travers des activités ludiques rattachées au contenu (Menelas & Otis, 2012).

De ce fait, en utilisant les technologies de la RV et les mécaniques des SG, nous proposons dans ce chapitre une nouvelle approche, la thérapie d'exposition centrée sur l'action (ACET pour *Action-Centred Exposure Therapy*), pour le traitement des personnes souffrant de TSPT en utilisant la Thérapie d'Exposition par la Réalité Virtuelle (TERV). Le chapitre est structuré comme suit : dans la section 6.2, nous analysons les théories de l'apprentissage pour souligner l'importance de l'action. La section 6.3 décrit l'approche ACET, suivit en section 6.4 du résumé d'un cas empirique associé à cette approche.

6.2 ÉVOLUTION DES THÉORIES DE L'APPRENTISSAGE

Depuis les travaux de Pavlov sur le conditionnement et les réactions réflexes, les théories de l'apprentissage ont évolué vers des approches de plus en plus actives. Alors que les théories behavioristes considèrent l'apprentissage comme une succession de stimuli et de réponses (Malone, 1991; Watson, 1913), les théories cognitivistes et constructivistes axent le processus sur une tâche de traitement de l'information utilisant les fonctions cognitives que sont la perception, l'attention, la mémoire, le langage et les

activités intellectuelles (Miller, 2003). En ce sens, durant le processus d'apprentissage, l'information est traitée en prenant en considération l'état actuel des connaissances du sujet. Ce dernier utilise son image mentale organisée pour se représenter la situation courante (Johnson & Crowe, 2009; Tolman, 1948). À la fin du processus d'apprentissage, il a une nouvelle représentation qu'il pourra réutiliser dans les situations futures. Ainsi, le sujet construit sa propre connaissance. Bien que la présence d'un superviseur soit nécessaire (Reigeluth, 1989), l'apprenant reste autonome. Il apprend par exploration, manipulation et modification de son environnement (Clancey, 1986; Parés & Parés, 2001). Ses activités d'apprentissage nécessitent la réflexion, le raisonnement, l'action et la prise de décision (Little, 1991). De ce fait, l'apprentissage est un processus de création et d'acquisition de l'expérience qui implique l'engagement et l'implication de l'utilisateur dans des tâches spécifiques en lien avec le but recherché (Bednar, Cunningham, Duffy, & Perry, 1992).

Comme mentionné à la section 2.3.1, la thérapie par exposition opère suivant un mécanisme d'apprentissage. Selon un apprentissage behavioriste basé sur le conditionnement opérant, le sujet a tendance à répéter les actions qui produisent des récompenses (Skinner, 2011). L'on pourrait donc s'attendre à ce que le patient puisse reproduire autant que possible les actions qui réduisent son anxiété durant la thérapie. En combinant cet aspect aux modèles cognitivistes et constructivistes, nous nous attendrions également à une modification positive des *patterns* du comportement des patients au fil des sessions, car il va acquérir de l'expérience à travers ses activités autonomes. À la fin de la thérapie, il pourra utiliser sa nouvelle image mentale pour se représenter les situations anxiogènes à venir. Nous avons supposé que tout cela pourra être facilité si la

thérapie est centrée sur des actions spécifiques du patient dans l'Environnement Virtuel (EV). C'est ce qui nous a poussés à proposer l'approche ACET ci-dessous présentée.

6.3 THÉRAPIE D'EXPOSITION CENTRÉE SUR L'ACTION (ACET POUR ACTION-CENTRERED EXPOSURE THERAPY)

De nombreuses théories du TSPT s'accordent à dire que ce trouble est le résultat d'associations pathologiques de stimuli avec une menace (Ballenger et al., 2000). Par conséquent, il s'ensuit que le traitement impliquerait de désapprendre ces associations et d'en apprendre de nouvelles (Powers et al., 2007; Straube, Glauer, Dilger, Mentzel, & Miltner, 2006). C'est dans cette optique que l'ACET entend combiner à la fois les théories behavioristes, cognitivistes et constructivistes de l'apprentissage pour mieux approcher la TERV.

6.3.1 PRINCIPE DE L'ACET

Contrairement à l'exposition passive du sujet aux stimuli relatifs au trauma, nous présentons l'ACET comme une thérapie progressive, non pas au sens de l'intensité des stimuli, mais au sens de l'évolution de la confiance du patient vis-à-vis de son environnement pour faciliter le traitement. Comme le principe du traitement émotionnel spécifie que la mémoire de peur soit activée avant toute chose (Straube et al., 2006), nous soutenons que cette activation ne doit pas être très confrontante pour le patient. Par conséquent, l'objectif principal d'un traitement basé sur l'ACET ne se limite pas seulement à la provocation des réactions émotionnelles (Schwarzer, 2014), mais vise à donner l'occasion au patient d'apporter des réponses motrices à ces réactions émotionnelles afin de surmonter son anxiété sans évitement. Ainsi, la confrontation avec

les stimuli anxiogènes se veut quelque peu indirecte, permettant au patient de prendre confiance lors de l'exposition (Menelas et al., 2018).

6.3.2 LES PHASES DE L'ACET

L'approche ACET consiste en trois principales phases.

6.3.2.1 PHASE 1 : TRIVIALISATION DES STIMULI ASSOCIÉS AU TRAUMA

Il est bien connu que les personnes souffrant de TSPT consomment souvent de manière excessive de l'alcool et/ou des drogues (Arnab et al., 2015; Lang, 1977). Nous voyons cela comme leur effort pour faire face aux effets du TSPT. Nous supposons donc que ces personnes sont prêtes à accepter un autre moyen d'échapper à leurs symptômes quotidiens. C'est pourquoi la première étape de notre approche est de trivialisier l'EV qui sera utilisé pour la thérapie. L'idée est de dénaturer l'environnement pour que l'utilisateur puisse se l'approprier. En effet, bien qu'un utilisateur ait été traumatisé par une situation donnée, il peut toujours imaginer un monde trivialisé, un environnement magique lié à la situation considérée dans laquelle il pourra s'amuser. Prenons par exemple le cas de patients souffrant de traumatismes liés à un accident de camion (Menelas et al., 2018). Ces personnes peuvent facilement avoir une forte réaction émotionnelle à la simple vue d'un camion (même virtuel). Dans ce cas, l'environnement féérique peut être une autoroute réaliste où le patient conduit un tapis volant. L'étude présentant ce cas a montré qu'un tel changement appliqué au monde virtuel a permis au patient de vivre une expérience de jeu unique dans laquelle il a eu le plaisir de s'approprier les mécaniques de conduite virtuelle (Menelas et al., 2018). Nous complétons donc en disant que cette phase

d'exposition dans l'environnement trivialisé permet aussi au patient d'expérimenter les actions sur lesquelles sa thérapie est centrée.

6.3.2.2 PHASE 2 : PASSAGE DE LA TRIVIALISATION À LA RÉALITÉ

Une fois que le patient a pris plaisir à expérimenter l'environnement fantastique, cette phase vise à l'amener dans un univers plus « réaliste » tout en exploitant les actions précédemment apprises. Pour ce faire, les éléments de décor propres à la trivialisation de l'environnement doivent être remplacés par leurs représentations réelles. Ainsi, dans l'exemple de cas cité ci-dessus (Menelas et al., 2018), le tapis volant est remplacé par un camion. Nous reconnaissons que l'environnement à ce stade est un environnement potentiellement anxiogène. Cependant, contrairement aux thérapies axées sur les stimuli anxiogènes, notre fondement théorique repose sur l'action. On s'attend donc à ce que le patient focalise toute son attention sur ses actions de thérapie. En conséquence, on attend de lui qu'il soit capable de générer d'autres associations non problématiques avec les éléments potentiellement anxiogènes. À ce stade, il devrait déjà commencer à se détacher de ses cognitions dysfonctionnelles post-trauma.

6.3.2.3 PHASE 3 : EXPOSITION INDIRECTE À LA SITUATION TRAUMATIQUE

La dernière phase, considérée comme la plus délicate, implique l'exposition indirecte du patient à des stimuli anxiogènes. Une surveillance accrue du niveau d'anxiété du patient est importante pour éviter de le « retraumatiser ». L'idée est d'aider le patient à comprendre que les stimuli associés à son trauma font partie du monde et ne doivent donc pas être ignorés. Il doit intégrer que de tels stimuli ne sont pas aussi problématiques qu'il le pensait auparavant. L'impact de cette confrontation sera perceptible à travers les

comportements observables du patient. Pour l'étude citée ci-dessus (Menelas et al., 2018), ces comportements comprenaient la verbalisation et la tentative d'éviter le lieu de l'accident (situation traumatique).

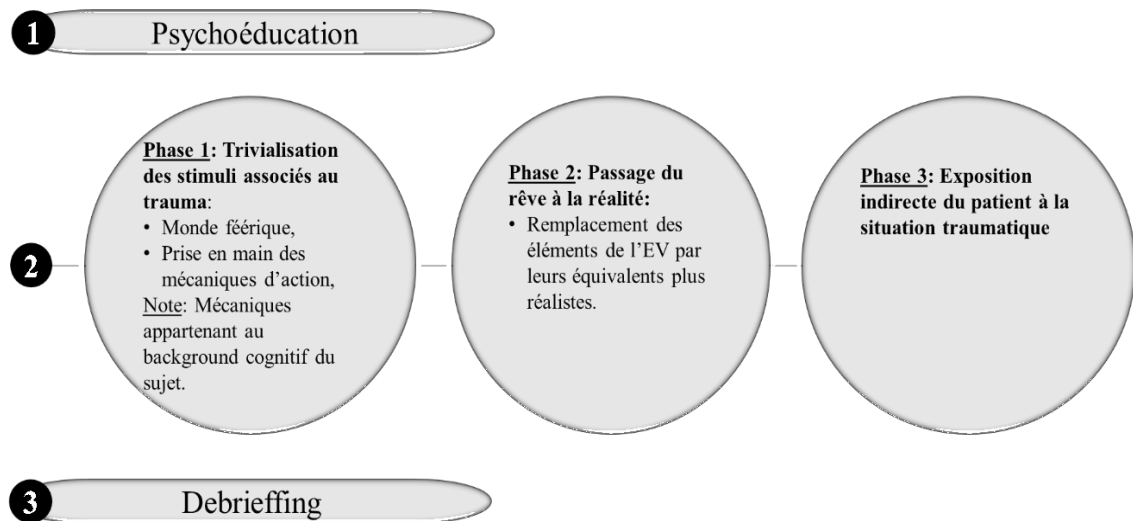


Figure 3 : Les phases de l'ACET

6.3.3 CHOIX DES ACTIONS À INCLURE DANS LA THÉRAPIE

Pour déterminer les actions qui vont permettre de mieux atteindre les objectifs de la thérapie à travers les trois phases précédentes, nous avons proposé d'appliquer le modèle *learning mechanics–game mechanics* (LMs-GMs) proposé par Arnab et al. (2015). Ce modèle suggère que l'acquisition des connaissances et des compétences peut être réalisée grâce à des mécaniques de jeu qui permettent des actions dans le monde du jeu. Le modèle LMs-GMs est basé sur les théories de l'apprentissage et sur différentes méthodes d'interaction issues de la littérature sur la théorie des jeux. Selon ce modèle, le processus de gamification concrétise efficacement la transition des principales mécaniques d'apprentissage vers les mécaniques de jeu impliquées (Fabricatore, 2007). Une telle transition se produit au moyen d'une activité auto-dirigée du sujet qui peut être

soit un nouvel apprentissage inclus dans les mécaniques de jeu, soit l'utilisation de certains réflexes issus du *background* cognitif du sujet (actions auxquelles le sujet est habitué) (Fabricatore, 2007; Menelas & Benaoudia, 2017). Dans le contexte de l'approche ACET, nous avons proposé de considérer le profil du patient, le contexte et les objectifs de la thérapie lors du choix des mécaniques. S'il est difficile ou impossible de tirer des mécaniques du *background* cognitif du patient, nous proposons que des métaphores simplistes soient utilisées afin de ne pas compliquer l'apprentissage principal de la thérapie (apprentissage d'associations saines). Dans les cas où la prise en main des mécaniques est difficile pour le patient, des fonctions d'assistance passives ou actives peuvent être incluses dans le système (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006).

6.3.4 POINTS D'IMPACT DE L'ACET

Dans le contexte de l'ACET, nous lions l'action du patient aux méthodes dites actives de l'apprentissage basées sur un processus de découverte, de réflexion et de prise de décision. Le patient acquiert de nouvelles compétences et de nouveaux comportements à travers sa construction logique. Cette construction implique des activités sensorielles, motrices et cognitives et est étendue à l'analyse des conséquences sur l'environnement d'exposition. Les actions réalisées sont liées au contenu de l'EV et aux attentes du patient. Ces attentes sont « une interprétation de la situation actuelle en fonction des interactions antérieures » (Clancey, 1986). Ainsi définies, les actions du patient pourraient avoir des impacts à plusieurs niveaux de thérapie :

- Au niveau de la motivation et de l'engagement : en participant à la tâche d'acquisition de nouvelles compétences pendant le traitement, le patient pourrait être plus engagé et se sentir plus motivé à poursuivre le traitement

(Wiederhold & Bouchard, 2014). C'est une caractéristique importante compte tenu du taux élevé d'abandon des thérapies d'exposition traditionnelles.

- Au niveau de l'observation et de l'auto-efficacité perçue : l'action a le grand avantage d'être observable à la fois par le thérapeute et le patient. Cela permet au thérapeute de mieux comprendre l'état et la progression de son patient (Menelas et al., 2018). Pour le patient, l'action favorise la perception de son efficacité personnelle (Riva, Waterworth, & Murray, 2014).
- Au niveau de la personnalisation du traitement : étant donné que l'action est propre à chaque individu parce qu'étant lié à la notion de réflexion et de prise de décision (Little, 1991), chaque patient aura la capacité d'adapter progressivement son action à ses propres besoins thérapeutiques.
- Au niveau de la présence : particulièrement pour la thérapie d'exposition *in-virtuo*, le sentiment de présence du patient est essentiel pour initier les processus de traitement (Wiederhold & Bouchard, 2014). L'action permet au sujet de participer aux événements de l'EV, ce qui pourrait améliorer son sentiment de présence dans l'environnement (Hoffman, Garcia-Palacios, Carlin, Furness Iii, & Botella-Arbona, 2003).
- Au niveau de la consolidation des associations : puisque le but de la thérapie est de faciliter un nouvel apprentissage en créant des associations entre les stimuli et « l'absence de problème », ces associations peuvent être facilitées par l'action (Najavits, 2002). L'apprentissage peut être consolidé par la pratique répétitive dans différents contextes d'EV, promouvant ainsi la généralisation dans la vie post-thérapie du patient (Wiederhold & Bouchard, 2014).

6.4 CAS EMPIRIQUE

Nous analysons ici une étude pouvant constituer une preuve de concept de l'approche ACET. Il s'agit du traitement d'un ancien chauffeur de camion qui souffrait de TSPT à la suite d'un accident (Menelas et al., 2018) : « *Après une crevaison, son camion se retourne et prend feu, il perd connaissance, puis se réveille en entendant un conducteur lui crier de se mettre à l'abri par crainte d'explosion* » (Menelas et al., 2018). Depuis cet accident, le patient qui avait été conducteur de camion depuis 20 ans était inactif. Il était continuellement anxieux et déprimé. Avant cette étude, il était suivi par un psychiatre et sous traitement médicamenteux.

Le simulateur proposé pour le traitement a été développé pour être personnalisable pour de nombreux profils de patients. L'EV fournissait à la fois des stimuli liés à des situations stressantes pour un conducteur de camion et diverses possibilités d'action. Ces deux composants ont été mis en œuvre à travers deux processus : la gamification et la personnalisation du simulateur de conduite de camion.

6.4.1 GAMIFICATION ET PERSONNALISATION DU SIMULATEUR DE CONDUITE DE CAMION

Les processus de gamification et de personnalisation étaient programmés pour donner la possibilité de créer, pour de nombreux profils de patients, un EV presque identique à l'environnement du trauma, capable d'évoquer des émotions et d'offrir des scénarios flexibles (Ecrepont, Haidon, Girard, & Menelas, 2016). Ainsi, un éditeur d'environnement intégré directement dans le moteur de jeu « *Unreal Engine 4* » a été développé. Pour ce faire, l'accent a été mis avant tout sur la gestion de la personnalisation

des routes, car la route est l'élément clé pour un camionneur dans l'exécution de sa tâche. Les stimuli anxiogènes ont été conçus sur la base des scénarios traumatique dont des accidents impliquant des véhicules autres qu'un camion et dont la gravité peut être adaptée à l'état mental d'un patient. Un outil de mise à jour du temps de la journée et de la météo a été prévu. De plus, le camion virtuel pouvait être personnalisé pour un patient afin de ressembler à son ancien camion réel. Enfin, il existait une option dans le jeu pour attacher des remorques au camion du conducteur.

6.4.2 MATÉRIELS

Divers appareils ont été exploités pour créer un simulateur de conduite de camion immersif et peu coûteux. L'aspect immersif a été principalement géré par un casque de RV (Sony HMZ-T2 / T3, Sony, Tokyo, Japon) et un appareil contenant à la fois le volant, la boîte de vitesses et les pédales (Logitech G27 3 Driving Force GT Racing Wheel, Logitech, Pommès, Suisse) pour la conduite. Pour le Sony HMZ-T2 / T3, une interface a été développée avec le système de suivi de la tête NaturalPointTrackIR 5 (NaturalPoint, Inc., Corvallis, Oregon, États-Unis) pour refléter un sentiment de réalisme.

6.4.3 PROCESSUS THÉRAPEUTIQUE

La thérapie s'est étendue sur huit sessions regroupées en trois étapes comme suit :

Les deux premières séances étaient consacrées à la préexposition du chauffeur de camion à l'aide d'une allégorie : le tapis volant. Le tapis était contrôlé à l'aide du système de suivi de la tête rattachée au casque de RV et du volant. Les actions étaient celles de la conduite d'un véhicule. Ces séances ont permis au conducteur de se familiariser avec son environnement d'exposition et de se reconnecter aux mécanismes de conduite sans

exposition directe à un camion. Nous attribuons cela à la première phase de l'ACET qui est **la trivialisation des stimuli associés au trauma du chauffeur de camion (voir section 6.3.2.1)**.

La troisième séance de thérapie constituait la première exposition au camion. Le patient devait se promener dans un stationnement virtuel contenant plusieurs camions et choisir celui qu'il conduirait éventuellement. Son choix de véhicule a été l'action principale de cette séance, car il symbolisait un premier pas vers l'acceptation de la conduite du camion choisi et témoignait de l'engagement de ses actions dans sa thérapie. Au cours de cette séance, les stimuli indirects pouvant provoquer de l'anxiété étaient des camions, en particulier ceux ressemblant à celui impliqué dans le trauma du patient. La quatrième et la cinquième séance ont consisté à conduire ce camion librement, sans être exposé à un accident, mais dans des conditions météorologiques variables. Là encore, le patient était constamment actif : il parlait, allumait la radio, reprenait ses habitudes usuelles de conduite, avait des comportements concrets, et le thérapeute observait son évolution et ses stratégies d'évitement. Ses actions représentaient son engagement, sa motivation et sa présence dans l'EV. Il renouait avec ses réflexes rationnels, ses compétences de conduite et le plaisir de conduire. Les stimuli indirects ici étaient la conduite en elle-même, et les itinéraires que le patient connaissait, y compris celui sur lequel son accident avait eu lieu (à cette étape, il a essayé d'éviter ce chemin). Le patient contrôlait l'environnement et agissait pour faire progresser son traitement ; il n'a pas abandonné et n'a pas perdu le contrôle de la situation ni sa lucidité. Le traitement a évolué en ajoutant une mission de remorquage à la conduite. Une fois de plus, la séance a été caractérisée par un certain nombre d'actions et de réactions témoignant de sa concentration et de ses sentiments face à ses réalisations et à son stress. Des changements dans sa conduite après le remorquage illustraient encore sa « présence comportementale

» dans le scénario, car il sentait qu'il y avait une charge plus lourde et conduisait donc plus lentement et avec plus de précautions. Nous attribuons ces trois séances à la deuxième phase de l'ACET qui est le **passage de la trivialisation à la réalité (voir section 6.3.2.2)**.

La sixième séance a indirectement exposé le patient au traumatisme et consistait à dépasser un camion en feu sur le bord de la route. Le patient a réagi en extériorisant et en verbalisant de manière excessive et ostentatoire. Il a refusé de s'arrêter sur les lieux de l'accident et a préféré continuer à conduire son camion. De cette façon d'agir et d'interagir avec la simulation de son trauma, on pouvait voir que malgré ses comportements d'évitement, le patient a pu garder le contrôle et choisir une issue rationnelle. C'était un progrès positif dans le traitement. Nous attribuons cette séance à la troisième phase de l'ACET qui est **l'exposition indirecte à la situation traumatique (voir section 6.3.2.3)**

Pour les deux dernières sessions, comme lors de la quatrième session, l'accent était de nouveau mis sur les mécanismes moteurs.

À la fin du traitement, le conducteur s'est reconnecté à la réalité. Il a affirmé qu'il n'avait plus l'intention de conduire des camions et pouvait entreprendre une reconversion professionnelle. Cette prise de conscience est synonyme de succès du traitement, car l'ancien conducteur a pu devenir actif et reprendre le cours de sa vie normale. La thérapie lui a permis de prendre du recul par rapport à son traumatisme et de renouer avec son identité et la réalité de sa condition. Il s'est dissocié de son camion avec lequel il avait appris à faire corps. Il a également accepté de ne pas être héroïque et invincible. Ces

changements signifiaient qu'il pouvait « passer à autre chose » et « prendre le contrôle » de sa vie.

6.4.4 DISCUSSION

Chaque étape du jeu a permis au patient de renouer avec ses capacités et ses émotions. Le thérapeute a pu observer l'externalisation des améliorations et des émotions du patient afin de tirer des conclusions exploitables. Par exemple, lors du choix d'un camion au début du traitement, le patient n'avait jamais choisi un camion comme celui qu'il conduisait, mais à la fin du traitement, il a finalement choisi un camion rouge comme le sien. Ce choix était directement observable par le thérapeute et traduisait une amélioration de son état émotionnel vis-à-vis de son traumatisme, ses croyances et ses comportements dysfonctionnels. L'action du sujet et les stimuli indirects liés à son traumatisme étaient au centre de chaque étape. Dans cette étude de cas, les aspects de l'ACET sont clairement perceptibles: l'exposition indirecte et progressive à des stimuli anxiogènes, le libre arbitre du sujet, la présence et immersion du sujet, l'engagement et motivation, l'externalisation observable et représentative des émotions et des comportements, la réappropriation de compétences comportementales, la perception des progrès et des acquis, la rééducation comportementale et cognitive, et enfin la réparation et le renforcement du lien avec la réalité et sa propre identité.

6.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons décrit les fondements théoriques d'une nouvelle approche : l'ACET. Elle se concentre sur l'action et l'activité du patient dans son environnement d'exposition. Elle consiste en trois phases principales. La première est

dédiée à la trivialisation des stimuli associés au trauma, le but étant de dénaturer l'environnement pour permettre au patient de pouvoir se l'approprier tout en expérimentant les actions sur lesquelles sa thérapie est centrée. La deuxième phase amène le patient dans un univers plus « réaliste ». Dans cet environnement potentiellement anxiogène, on s'attend à ce que le patient s'accroche sur l'action comme centre d'intérêt et puisse faire d'autres associations non problématiques avec les stimuli anxiogènes. La dernière phase consiste en une exposition indirecte aux stimuli anxiogènes. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter le prolongement de l'approche ACET vers une vision éactive qui s'intéressera aussi au rôle de l'environnement lors de la thérapie.

CHAPITRE 7

APPROCHE ÉNACTIVE DE TRAITEMENT

Résumé : Depuis l'antiquité, les philosophes ont enseigné qu'il n'y a pas d'archétype humain, les Hommes sont plutôt façonnés par l'environnement. De nos jours, la théorie de l'énaction suppose que les processus cognitifs sont non seulement présents dans l'esprit du sujet, mais également ancrés dans la perception sensorielle de l'environnement et les actions motrices. Dans ce chapitre, nous étudions comment la thérapie d'exposition par la réalité virtuelle pour le trouble de stress post-traumatique peut être vue du point de vue de la théorie de l'énaction. Pour ce faire, nous montrons que les notions de situation et d'interactions qui sont au cœur de l'approche énaactive doivent jouer un rôle central dans le processus de traitement. Nous établissons ensuite que la mise à jour automatique de l'environnement virtuel en fonction des actions et de l'état émotionnel de l'utilisateur définit une implémentation pratique de l'approche énaactive.

7.1 INTRODUCTION

Dans les études actuelles de Thérapie d'Exposition par la Réalité Virtuelle (TERV) pour le Trouble de Stress Post-Traumatique (TSPT), on note une emphase particulière sur la composante « modélisation 3D » de la Réalité Virtuelle (RV), mettant ainsi le patient dans une posture d'observateur. Ces études visent uniquement à favoriser la narration du patient pour une exposition par imagination (Sherrill, Rothbaum, McSweeney, & Rothbaum, 2019). En effet, l'exposition par imagination consiste pour le thérapeute à inciter le sujet à se souvenir de son trauma, généralement par narration, afin de réduire la réponse dysfonctionnelle à ses pensées problématiques. Ainsi, dans les TERV actuelles, les technologies de la RV sont utilisées pour enrichir cette imagination en présentant au patient des scènes 3D, à grandeur humaine, qui correspondent à sa narration (Beck et al., 2007; Cárdenas & De La Rosa, 2012; Difede & Hoffman, 2002; Gamito et al., 2007; Josman et al., 2008; Mozgai et al., 2020; Rizzo et al., 2006; Rizzo et

al., 2017; Rothbaum et al., 1999). L'immersion de ce dernier est parfois renforcée par l'ajout de sons et/ou d'odeurs dans l'Environnement Virtuel (EV), l'idée étant de stimuler au maximum les sens du patient afin qu'il puisse se rappeler de la situation traumatique (Gahm et al., 2015; Josman et al., 2008; Kramer et al., 2013; Tworus et al., 2010; Walshe et al., 2005; Walshe et al., 2003). Néanmoins, certaines études rapportent les tendances comportementales réalistes manifestées par le sujet lors de son exposition, alors que l'outil de RV concerné ne lui permettait pas de mettre en œuvre ces comportements dans l'EV (Gamito et al., 2007). Ainsi, on peut aller au-delà d'une thérapie d'exposition centrée sur l'action et mettre l'accent sur l'influence mutuelle que le patient et l'environnement ont l'un sur l'autre. À partir de là, l'EV devient un élément qu'il faut considérer au même titre que le sujet lors de la TERV.

Dans ce chapitre, nous proposons et développons une nouvelle approche basée sur l'énaction pour mieux mettre en évidence l'importance de l'évolution simultanée et dynamique du sujet et de l'EV lors du processus d'apprentissage dans une TERV pour le TSPT. En gardant comme point de départ que l'apprentissage est l'élément clé de l'exposition, nous commençons par établir le lien entre le paradigme de l'énaction, le TSPT, l'apprentissage et la TERV (section 7.2). Ensuite, nous faisons ressortir la complémentarité du sujet et de l'environnement en section 7.3. Enfin, aux sections 7.4 et 7.5, nous développons notre approche énaactive de traitement.

7.2 ÉNACTION, APPRENTISSAGE, TSTP ET TERV

Développé par Varela, Thompson et Rosch (2017), l'énaction enseigne que la cognition n'est pas seulement interne à l'individu, mais qu'elle est aussi intimement liée à

la situation dans laquelle elle survient (Masciotra & Roth, 2007d). Cette approche met en évidence le rôle de l'environnement, du corps du sujet, de son activité physique et de ses expériences passées dans la cognition (Antle, 2009). Elle soutient que les processus cognitifs sont ancrés dans le comportement sensoriel, les actions motrices et la perception que le sujet a de son environnement.

7.2.1 ÉNACTION ET TSTP

La notion d'énaction décrit comment les organismes vivants interagissent continuellement avec leur environnement pour se réorganiser afin de maintenir leur équilibre (Varela, Thompson, & Rosch, 2016). Elle réside dans l'idée que chaque organisme génère le monde dans une boucle sensori-motrice d'actions et de rétroaction qui servent à guider ces actions (Bourgine & Stewart, 2004; Stewart, 2010). Ainsi, le sujet et l'environnement sont définis comme deux entités mutuellement conditionnées à évoluer ensemble (De Loor et al., 2014). Pour l'énaction, l'environnement du sujet n'est pas une entité extérieure, mais une extension de celui-ci (De Loor et al., 2014). Contrairement à ces paradigmes qui considèrent la cognition comme interne à l'individu, l'énaction soutient l'idée d'une cognition autant interne au sujet que distribuée dans l'environnement, car, le corps-esprit ne peut pas fonctionner en dehors du monde (Masciotra & Roth, 2007a, 2007d). C'est la perception que le sujet a du monde qui lui permet de créer une réalité (Stewart, 2010).

C'est ce qui se passe chez les personnes souffrant de TSPT ; après avoir vécu la situation traumatique, le trouble du sujet est le résultat d'une activité mentale qui l'amène à se transformer négativement en forgeant des visions négatives de lui-même et du monde dont il fait partie (APA, 2013). Si le trouble du sujet existe, c'est parce que le monde

existe et la situation traumatique a existé dans ce monde. Ainsi, le trouble n'est pas seulement quelque chose qui existe dans l'esprit du sujet, mais aussi en relation avec une situation extérieure ayant des caractéristiques spécifiques. Par conséquent, l'anxiété est généralement activée lorsque le sujet est confronté à une telle situation. On peut donc dire que les cognitions dysfonctionnelles du sujet sont également réparties dans certains éléments de son environnement externe.

7.2.2 ÉNACTION ET APPRENTISSAGE

L'approche enactive rejoint l'idée de l'approche par compétences qui prône la création de situations d'apprentissage plus proches de la réalité (Brahimi, Farley, Joubert, Jobin, & Vézina, 2014). De même, en se basant sur l'énaction, Masciotra et Roth (2007a) soulignent que l'apprentissage implique toujours une personne en action et en situation: *un être en situation de...* Par conséquent, l'apprentissage doit impliquer non seulement la cognition du sujet, mais aussi tout son être, qui opère dans et par l'interaction avec l'environnement. Alors, bien qu'étant deux entités opérationnellement indépendantes, le sujet et l'environnement deviennent inséparables (Antle, 2009). L'apprentissage devient alors un processus récursif dans lequel le sujet effectue des actions qui modifient l'environnement tout en étant transformé par l'environnement à travers de nouvelles informations en réponse à ses actions. Ainsi, la connaissance générée est le résultat d'interactions dynamiques entre le sujet et l'environnement (Willans, Rivers, & Prasolova-Førland, 2016).

7.2.3 ÉNACTIION ET TERV

Le paradigme de l'énaction pourrait facilement être appliqué à la TERV. Cependant, à la lumière des travaux effectués dans ce domaine, on note que les procédures actuelles semblent considérer la cognition comme seulement interne au sujet, et leur objectif principal demeure de modifier cette cognition interne, car les situations de RV sont utilisées juste pour évoquer de l'anxiété chez le sujet (Beck et al., 2007; Difede & Hoffman, 2002; Rizzo et al., 2006; Rizzo et al., 2017; Rothbaum et al., 1999; Rothbaum et al., 1996; Walshe et al., 2005; Walshe et al., 2003; Wood et al., 2008). Mais, selon la théorie de l'énaction, la cognition est également distribuée dans l'environnement et dans les éléments qu'elle contient (Masciotra & Roth, 2007a, 2007d). Ainsi, la TERV suivant le paradigme de l'énaction favoriserait un meilleur apprentissage des compétences grâce à des interactions naturalistes et itératives, dans le but de modifier les cognitions internes et externes des sujets, leur permettant de construire une nouvelle relation plus saine avec leur environnement. Puisque le travail est fait sur la recherche d'une relation plus saine entre le sujet et son environnement, nous émettons l'hypothèse que les compétences acquises de cette façon pourraient être efficacement transférées dans la vie post-thérapie du sujet.

7.3 MISE EN ÉVIDENCE DE LA COMPLÉMENTARITÉ DU SUJET ET DE L'ENVIRONNEMENT

Lorsqu'il opère dans un environnement, le sujet utilise non seulement ses structures cognitives, mais également ses capacités sensori-motrices. Pour caractériser l'apprentissage du point de vue de l'énaction, Masciotra, Roth et Morel (2007) parlent du complexe : *personne en action et en situation*. Pour tout être humain, chaque moment de

la vie constitue une situation dans laquelle il est situant et est situé. Le sujet est situé dans le contexte dans lequel il agit et par rapport à la transformation qu'il subit, mais est aussi situant parce qu'il accomplit des actions qui modifient son environnement. La *personne en action et en situation* effectue des actions en fonction de son état général, de sa disponibilité physique et cognitive, d'autres caractéristiques personnelles et des caractéristiques de l'environnement dans lequel elle se trouve (Masciotra & Roth, 2007b). Le comportement du sujet dans l'environnement dépend de la situation courante et de la manière dont ce dernier se l'approprie. Ainsi, la notion de situation est au centre de l'apprentissage, et donc au centre de tout processus thérapeutique.

7.4 LA NOTION DE SITUATION AU CENTRE DE TOUT PROCESSUS THÉRAPEUTIQUE

Consciemment ou non, la notion de situation est au cœur de toute forme de thérapie d'exposition, qu'elle soit par imagination, *in vivo* ou *in virtuo*. Tout processus thérapeutique pour le traitement du TSPT cherche à accéder à la mémoire de peur en établissant une correspondance entre le sujet et l'objet (c'est-à-dire la situation traumatique) avant de modifier les cognitions dysfonctionnelles. Par exemple, dans les thérapies par imagination, chaque sujet est invité à se remémorer des conditions environnementales de son traumatisme afin d'activer ses souvenirs traumatiques. Les conditions environnementales sont ici des représentations mentales, qui correspondent aux conditions personnelles du sujet et créent une situation spécifique. Dans le cadre de la thérapie d'exposition *in vivo*, l'environnement traumatique est presque reconstruit dans la vie réelle afin de faciliter l'accès à la mémoire de peur du sujet. De même, dans la TERV, les premières décisions à prendre consistent à choisir la ou les situations virtuelles

à proposer au sujet. Dans tous les cas, le succès de la thérapie sera lié à la façon dont le sujet vit la situation thérapeutique.

7.5 DÉVELOPPEMENT DE LA TERV SUIVANT LA PERSPECTIVE DE L'ÉNACTION

Dans le cadre de la thérapie d'exposition, le patient devrait apprendre des stratégies pour s'adapter aux différentes conditions potentiellement changeantes de sa vie future, plutôt que de subir une modification très ciblée de la mémoire de peur. L'idée d'appliquer l'énaction à la TERV serait de modifier à la fois les cognitions internes et externes du sujet et de permettre au sujet de construire une nouvelle réalité à travers une relation plus saine avec le monde. Compte tenu de la caractéristique principale de la RV pour l'exposition qu'est l'interaction (Bouchard et al., 2007), ces technologies représentent un atout non négligeable pour la mise en œuvre de stratégies qui conduiront le sujet à définir et maintenir un équilibre adaptatif malgré les changements perpétuels de son environnement. Colombetti et Thompson (2008) notent que «*Meaning and experience is created by, or enacted through, the conscious reciprocal interaction of the brain, the body and the world*». Par conséquent, le sujet a besoin de manipuler l'environnement pour apprendre, et donc créer « de la signification » à travers une boucle perception-décision-action. Ceci est d'autant plus possible avec la RV qui a pour but de permettre à l'utilisateur une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde numérique créé à l'échelle humaine (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006). Compte tenu de la flexibilité des scénarios et de l'adaptabilité offerte par les technologies de la RV, l'application de l'énaction à la TERV peut être mise en œuvre suivant une approche récursive qui visera à maximiser l'évolution concomitante du sujet et de l'EV dans un

couplage structurel : le sujet évoluant vers des pensées plus saines, et l'environnement évoluant de manière à être considéré comme non dangereux pour le sujet.

Pour mieux présenter la plus-value d'une approche énaactive de traitement, nous allons dans un premier temps illustrer le squelette général de la façon dont la TERV est abordée dans les études actuelles. Et dans un deuxième temps nous allons montrer comment elle peut être améliorée à l'aide de l'énaaction.

7.5.1 RAPPEL SOMMAIRE DES PROCÉDURES DE TERV ACTUELLES POUR LE TSPT

Les TERV actuelles se déroulent comme suit : le patient est équipé d'appareils d'exposition, généralement un casque de réalité virtuelle, avec une manette de jeu dans certains cas. Il raconte son trauma en explorant visuellement la scène virtuelle qui lui est présentée. Il pourrait éventuellement utiliser la manette de jeu pour naviguer dans l'EV. De son côté, le thérapeute a à sa disposition un menu lui permettant d'adapter l'EV en fonction de la description que le patient fait de l'évènement traumatique. Cette adaptation consiste en l'ajout de stimuli anxiogènes qui peuvent être visuels (par exemple l'ajout de trafic routier (Walshe et al., 2005)), auditifs (par exemple les sons d'explosions (Difede & Hoffman, 2002)), olfactifs (par exemple les odeurs de roues en feu (Rizzo et al., 2006)) ou tactiles (par exemple la vibration du siège du sujet (Walshe et al., 2005)). Un panneau de contrôle séparé est proposé au thérapeute (Mozgai et al., 2020; Rizzo et al., 2017). La Figure 4 montre les principaux composants qui existent dans ces systèmes TERV actuels.

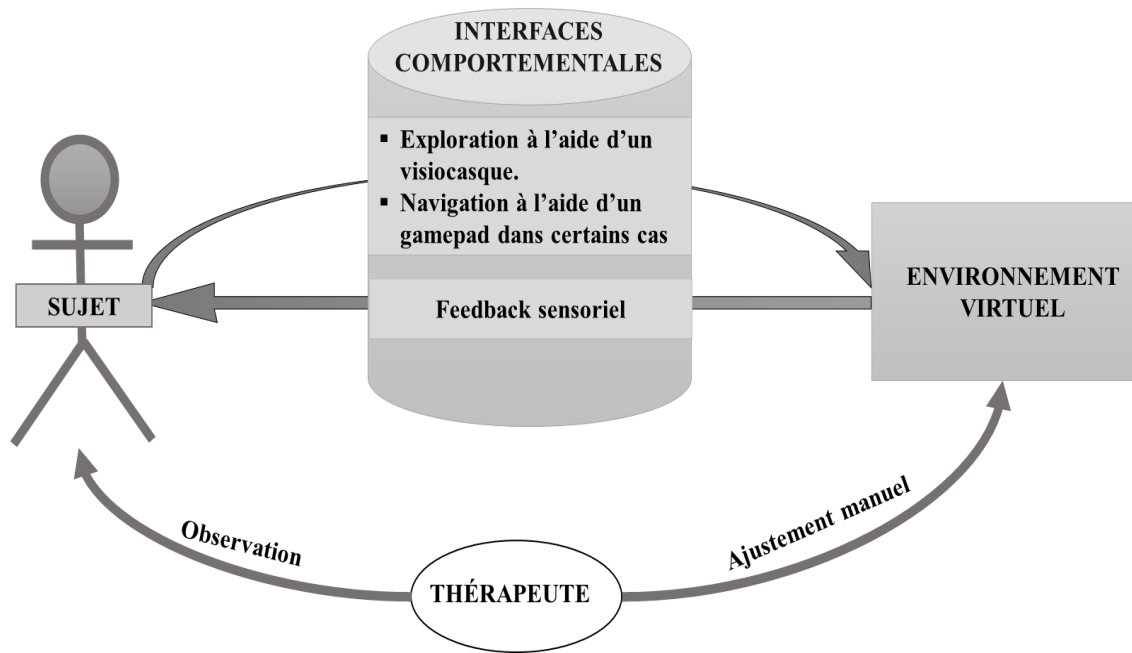


Figure 4 : Schématisation des systèmes de Terv actuels

7.5.2 ILLUSTRATION DE L'APPROCHE DE THÉRAPIE BASÉE SUR L'ÉNACTION

Dans la Figure 5, nous montrons comment la Terv peut être améliorée par l'approche enactive.

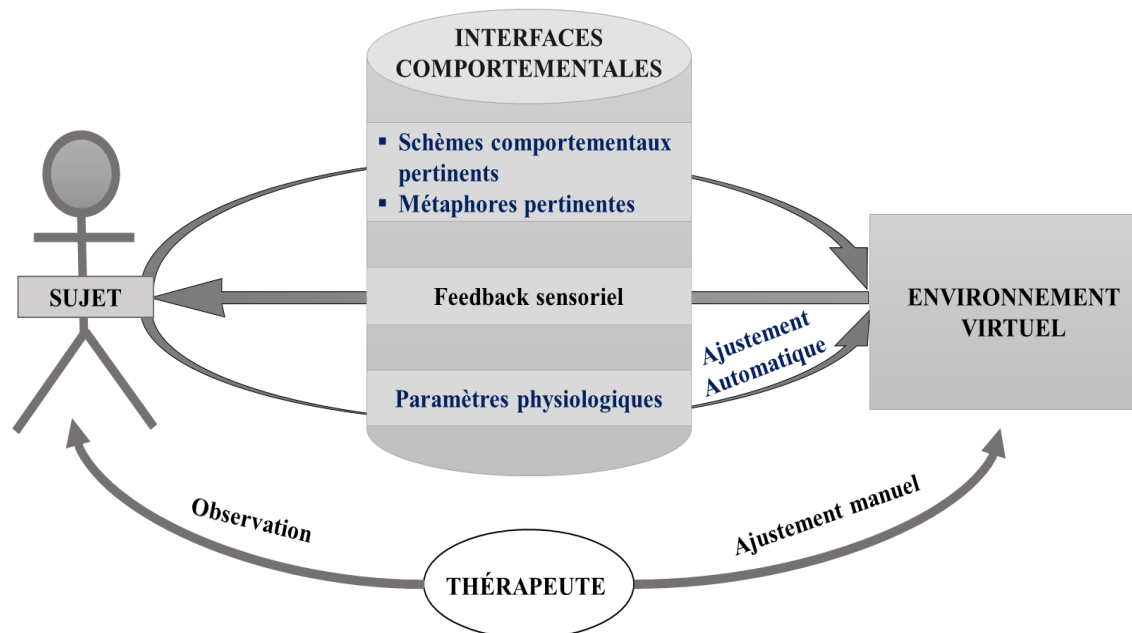


Figure 5 : Schématisation de la Terv suivant le modèle de l'énaction

Nous pouvons identifier trois éléments qui vont changer l'EV (et, ultimement l'utilisateur) pendant le traitement :

- 1) Les actions du sujet à travers les interfaces comportementales :** dans un EV, la perception du sujet ne se limite pas à la simple modalité visuelle; elle est active (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006). Elle implique l'exploration de processus psychologiques et cognitivo-moteur qui lui permettent de concentrer son attention sur certains aspects de l'EV, de prendre des décisions et de transformer activement la stimulation sensorielle qu'il reçoit tout en se transformant.
- 2) L'ajustement de l'environnement virtuel par le thérapeute :** comme pour les autres formes de thérapie d'exposition, la présence du thérapeute reste cruciale dans la TERV. Celui-ci doit observer, analyser et accompagner les progrès du sujet. Sur la base de cette analyse, il pourrait décider de contrôler manuellement, en temps réel, le flux des événements dans l'EV afin de mieux l'adapter à l'état émotionnel actuel du sujet. Pour cela, un menu de sélection facile à utiliser doit être mis à sa disposition. Cependant, cela n'exclut pas que l'échange du patient avec l'environnement demeure au centre de la thérapie.
- 3) L'ajustement dynamique et automatique de l'environnement virtuel :** poursuivant dans le paradigme éactif, nous ajoutons aux deux éléments précédents une mise à jour automatique de l'EV en fonction de l'état émotionnel du sujet, tel que défini objectivement par des paramètres physiologiques. Ces paramètres physiologiques (par exemple, la fréquence cardiaque) peuvent être recueillis à l'aide d'un équipement approprié et transférés vers le logiciel de simulation à l'aide d'un module conçu à cet effet. Après avoir récupéré ces paramètres, un programme adapte l'EV en fonction de leurs valeurs.

Dans tous les cas, une boucle perception-décision-action est exécutée. L'EV est mis à jour au fur et à mesure qu'il reçoit de nouvelles informations extérieures à travers les actions du sujet, la paramétrisation par le thérapeute ou l'état émotionnel du sujet tel que capturé par des mesures physiologiques. Grâce à ces mises à jour, la perception globale du sujet vis-à-vis de l'EV change en fonction du retour sensoriel reçu du nouvel état de l'environnement. La boucle recommence alors au fur et à mesure que le sujet prend de nouvelles décisions et agit à nouveau sur l'environnement. Ce processus dynamique influe sur l'état émotionnel du sujet en même temps qu'il améliore son état psychologique général. En tant que telle, cette forme de TERV est une thérapie éactive dans laquelle le sujet co-évolue dynamiquement avec l'EV. L'objectif est que le sujet construise une relation plus saine avec l'environnement et soit capable de transposer efficacement ce développement dynamique adaptatif dans sa vie après la thérapie. Nous nous attendons ainsi à ce que dans le monde réel, le sujet puisse continuer à développer cette relation saine avec l'environnement tout en acceptant de s'adapter à d'éventuelles perturbations provenant d'entités extérieures (Masciotra & Roth, 2007c).

7.6 CONCLUSION

Avec les technologies de la RV, il est tout à fait possible de mettre l'accent sur l'échange entre le sujet et l'environnement dans la situation simulée dans l'EV de thérapie. Après avoir décrit la théorie de l'éaction, nous avons présenté son implication dans le TSPT et son application à l'apprentissage. Nous avons ensuite proposé le développement de la TERV suivant ce paradigme. Pour ce faire, nous sommes revenus sur la procédure de TERV utilisée dans les études actuelles afin de mettre en évidence des manquements qui pourraient être comblés en appliquant le principe phare de la théorie de l'éaction

qu'est d'évolution dynamique et concomitante du sujet et de l'environnement. L'approche énative de traitement favorisera les interactions entre le sujet et l'environnement. Elle exposera aussi indirectement le patient à la simulation de son trauma en lui faisant prendre conscience que le monde peut contenir des événements comme ceux associés à son trauma, mais qu'il est capital qu'il s'y adapte et apprenne à le percevoir d'une manière plus saine, plus sûre et plus heureuse. En mettant l'accent sur l'évolution dynamique, la relation entre le sujet et le monde se développera au fur et à mesure des actions du sujet et des réponses de l'environnement. Chacune de ces deux entités émergera. Après une TERV basée sur cette approche énative, le patient aura compris que chaque situation de sa vie post-thérapie constituera un processus d'interactions continues avec le monde. Il réalisera aussi qu'il n'est pas la seule entité vivante du monde et devra apprendre à conserver son identité malgré d'éventuelles perturbations externes. Une implémentation dans un simulateur de conduite de camion pour le traitement TSPT est présentée dans les deux chapitres suivants.

CHAPITRE 8

RAPPORT GÉNÉRAL SUR LA NOUVELLE CONCEPTION ET LE DÉVELOPPEMENT DU SIMULATEUR DE CONDUITE DE CAMION

Résumé : Dans ce chapitre, nous présentons le rapport général sur la nouvelle conception et le développement du simulateur de conduite de camion en fonction des approches de traitement proposées dans les deux chapitres précédents.

8.1 INTRODUCTION

Comme nous l'avons rapporté au CHAPITRE 6, une première version du simulateur de conduite de camion avait déjà été développée (Haidon, Ecrepont, Girard, & Menelas, 2017). Cependant, cette version n'était pas encore optimale. Dans un souci d'amélioration, nous avons été confrontés à plusieurs difficultés qui nous ont conduit à un recommencement. Les motivations qui ont guidé ce recommencement sont les suivantes :

- Les dispositifs étaient obsolètes : l'ancienne version du simulateur utilisait un casque Sony sans système de *tracking* intégré. Le dispositif de tracking était donc fixé séparément à une certaine distance de la tête de l'utilisateur. L'inconvénient majeur était l'instabilité de cette fixation, car le rendu visuel à l'écran n'était pas toujours celui qui était escompté. De même, le casque audio était détaché du HMD.
- La prise en main côté développeur était difficile : en effet trois groupes d'étudiants ont essayé de prendre en main le simulateur dans le but de l'améliorer, mais cela a été un échec, car il n'y avait pas de documentation explicite de conception et de développement.

- L'exploitation était difficile : malgré les fonctionnalités offertes par le simulateur, son exploitation par le thérapeute était quasiment impossible sans la présence d'un informaticien.

Nous décrivons ci-dessous la démarche de nouvelle conception de ce simulateur suivant le modèle de référence de la Réalité Virtuelle (RV).

8.2 DÉMARCHE DE CONCEPTION

Nous avons reconçu le simulateur suivant la démarche de conception de systèmes de RV proposée par (Fuchs, Moreau, Burkhardt, et al., 2006). Basée sur le schéma général de la RV, cette démarche suggère la prise en compte des trois niveaux d'immersion et d'interaction (fonctionnelles, cognitives et sensori-motrices).

8.2.1 LES IMMERSION-INTERACTION FONCTIONNELLES

Elles permettent définir les fonctionnalités de l'application. Ainsi, notre simulateur doit permettre à l'utilisateur de :

- Conduire un tapis volant en utilisant de manière efficace les mécaniques de conduite d'un camion à l'aide d'un système incluant un volant, une boîte de vitesse et des pédales.
- Entrer dans un camion.
- Conduire naturellement un camion virtuel comme il le ferait dans le monde réel.
- Percevoir de manière réaliste des environnements de conduite.

- Se déplacer soit pour explorer métaphoriquement l'Environnement Virtuel (EV) à pied, soit pour observer les camions dans un stationnement afin de choisir un à conduire.
- Lire des instructions textuelles dans l'environnement 3D pour s'informer et pour être guidé dans l'accomplissement de ses actions principales comme entrer dans le camion, démarrer le moteur, arrêter le moteur, allumer la radio, activer les essuie-glaces.
- Transmettre en temps réel son rythme cardiaque afin que l'EV soit adapté dynamiquement à son état émotionnel.

De ces fonctionnalités, nous avons fait ressortir des primitives comportementales virtuelles appliquées à notre simulateur. Les primitives comportementales virtuelles sont des activités élémentaires que l'utilisateur peut effectuer dans un EV (Fuchs, Moreau, Burkhardt, et al., 2006). Fuchs et al. (2006) les ont regroupés en quatre catégories qui sont : l'observation, le déplacement, l'action et la communication. Les primitives comportementales virtuelles utilisées dans notre simulateur sont les suivantes :

- **L'observation** : l'observation est mise en avant dans toutes les scènes du simulateur et est majoritairement considérée suivant la modalité visuelle.
- **Le déplacement**: le simulateur de conduite de camion offre à l'utilisateur deux types de déplacement : le déplacement « à pied » et le déplacement en conduite.
 - Le déplacement à pied se fait métaphoriquement en appuyant sur une touche du volant de conduite. Le rendu en EV correspond à l'illusion d'un déplacement comme dans la réalité.
 - Pour le déplacement en conduite, l'utilisateur déplace soit un tapis volant soit un camion dépendamment de la scène en cours. Ce mode de déplacement consiste en des mouvements de translation et de rotation

appliqués sur l'objet virtuel commandé (tapis ou camion). Le programme associé à ce déplacement consiste à calculer à chaque instant la nouvelle position du camion en fonction de la pression que l'utilisateur exerce sur les pédales d'accélération ou de frein, combiné à la rotation du volant. Cela lui permet d'avoir un déplacement pseudo naturel de son camion dans l'EV pendant qu'il est en train d'appliquer les comportements réels de conduite sur l'interface de conduite, tout en utilisant les mouvements de sa tête pour s'orienter et explorer l'EV.

- **L'action sur l'EV:** l'exploitation de notre simulateur de conduite de camion implique plusieurs actions de l'utilisateur. Les principales sont les suivantes : Les mouvements de la tête, l'observation, la sélection, le déplacement à pied et le déplacement en conduite.
- **La communication avec autrui ou avec l'application:** pour cette dernière primitive, notre simulateur de conduite de camion intègre un système d'ajustement dynamique de la difficulté qui permet de faire communiquer les paramètres physiologiques de l'utilisateur avec l'application pour ajuster dynamiquement l'EV. Dans cette même primitive, on peut noter la possibilité que le simulateur offre au thérapeute d'ajuster l'EV en fonction de ses remarques durant la thérapie. Ceci se fait à l'aide d'un menu 2D intuitif et facile d'utilisation.

8.2.2 LES IMMERSION-INTERACTION COGNITIVES

La considération des Immersion-Interaction cognitives permet notamment de gérer la modélisation des comportements de l'utilisateur dans l'EV. C'est à ce niveau que nous avons défini les schèmes comportementaux et les métaphores qui sont utilisées dans

le simulateur. Ainsi, conformément aux primitives comportementales virtuelles ci-dessus décrites, plusieurs Immersion-Interactions cognitives ont été appliquées au simulateur.

- Nous avons exploité le schème d'exploration visuelle d'un environnement qui consiste à effectuer les mouvements de la tête pour explorer visuellement l'environnement à 360 degrés.
- Nous avons exploité le schème de conduite qui consiste à effectuer des actions de conduite telles que l'appui sur les pédales et le guidage.

Nous avons des primitives comportementales virtuelles pour lesquelles nous ne pouvons pas appliquer des schèmes comportementaux efficaces. Nous avons donc déduit les métaphores suivantes pour ces dernières:

- Pour choisir et entrer dans le camion, l'utilisateur doit appuyer sur n'importe quelle touche du volant.
- Une fois dans le camion virtuel, l'utilisateur doit appuyer sur n'importe quelle touche du volant pour démarrer le moteur.
- Une fois le moteur démarré, l'utilisateur peut appuyer sur n'importe quelle touche du volant pour allumer la radio ou changer les chaînes de radio si celle-ci est déjà mise en marche.

Nous avons également intégré au simulateur des aides logicielles cognitives et sensori-motrices pour faciliter les activités de l'utilisateur. Par exemple :

- Nous avons élargi la boîte de collision du camion afin de détecter la position de l'avatar de l'utilisateur lorsqu'il est prêt à rentrer dans le camion.

- Nous avons ajouté un système de surbrillance sur le camion qui s'active lorsque l'utilisateur y est proche et permet ainsi d'indiquer lequel des camions est sélectionnable à un moment donné.
- D'autres aides cognitives ont consisté à ajouter des guides textuels à plusieurs points afin d'indiquer à l'utilisateur l'action qu'il peut ou doit effectuer à un moment précis. Par exemple, lorsque l'utilisateur est dans la zone de collision prévue pour détecter sa proximité avec la portière, le texte suivant s'affiche: *"Appuyez sur n'importe quelle touche du volant pour entrer dans le camion"*. Le fait de concentrer toutes les actions métaphoriques sur l'appui de n'importe quelle touche du volant constitue également une aide logicielle cognitive. Le but est de limiter la charge cognitive et le temps d'apprentissage associés à ces métaphores.
- La communication du thérapeute avec l'environnement se fait à travers un menu 2D intuitif et facile d'utilisation, car entièrement constitué de cases à cocher.
- Comme aide logicielle sensori-motrice, même si le Logitech G27 est fait avec une boîte à vitesse manuelle, nous avons programmé le simulateur pour que le camion puisse fonctionner en mode de transmission automatique. Nous avons aussi attribué une limite de vitesse raisonnable en cas de pression excessive de l'utilisateur sur la pédale d'accélération. Ceci est fait pour éviter que l'utilisateur ne perde totalement le contrôle de son camion en appuyant excessivement sur la pédale en cas de stress par exemple.

8.2.3 LES IMMERSION-INTERACTION SENSORI-MOTRICES

Ce niveau d'Immersion-Interaction concerne l'interfaçage physique entre l'utilisateur et l'EV. Nos interfaces matérielles ont été choisies de façon non seulement à être les plus transparentes possible pour l'utilisateur, mais aussi à lui offrir un temps d'apprentissage le plus minimal possible. L'objectif était d'assurer l'engagement du patient dans les tâches à réaliser dans l'EV tout en lui faisant oublier les artefacts de la simulation afin de favoriser son sentiment de présence. Pour ce faire, nous avons utilisé trois principales interfaces comportementales: le casque de RV *Oculus Rift* pour l'exploration visuelle, le Logitech G27 pour l'exploration manuelle et/ou pseudo-haptique, l'Hexoskin pour la communication du rythme cardiaque de l'utilisateur au simulateur, le tout exploitable sur un ordinateur de bureau à deux écrans. Nous décrivons ci-dessous chacun de ces dispositifs.

8.3 INTERFACES COMPORTEMENTALES UTILISÉES

8.3.1 LE CASQUE *OCULUS RIFT* POUR L'EXPLORATION VISUELLE

L'*Oculus Rift* (voir Figure 6) est un casque de RV confortable à 06 degrés de liberté isolant la vision de l'utilisateur du monde extérieur pour lui permettre une exploration naturelle du monde virtuel (Desai, Desai, Ajmera, & Mehta, 2014). Il a un champ de vision d'environ 120 degrés capable de simuler le champ de vision réel. Il est doté de deux petits écrans OLED de 5,7" chacun et ayant une définition de 1080×1200 pixels. L'*Oculus Rift* offre une fréquence d'affichage de 90 Hz. À l'aide de ses capteurs intégrés, il offre à l'utilisateur la possibilité d'explorer naturellement la scène virtuelle à 360 degrés. Il est vendu avec des manettes pour la manipulation de la scène virtuelle,

mais nous n'en n'aurons pas besoin dans ce simulateur. Ce visiocasque possède également des écouteurs audios qui se fixent directement sur les oreilles de l'utilisateur pour lui transmettre les sons de l'EV. Pour mieux s'adapter à différentes tailles de visages, le casque est réglable tant au niveau de la position des deux écrans, des écouteurs, que de la fixation du casque sur la tête de l'utilisateur.



Figure 6 : Casque de réalité virtuelle Oculus Rift

Source: (Kamkuimo K., Girard, & Menelas, 2020)

8.3.2 LE LOGITECH G27 POUR LA CONDUITE NATURELLE DU CAMION VIRTUEL ET POUR LES ACTIONS MÉTAPHORIQUES

L'interface de conduite de camion est le Logitech G27¹⁷ (voir Figure 7). Il s'agit d'un ensemble doté d'un volant, d'un levier de vitesse et des pédales d'accélération, de

¹⁷ <https://www.logitechg.com/fr-ca/products/driving/driving-force-racing-wheel.html>

frein et d'embrayage. Le volant est un dispositif à retour d'effort ayant un angle de rotation d'environ 900 degrés et doté de 06 boutons sur lesquels pourraient être rajoutées des commandes spécifiques. Pour faciliter la tâche à l'utilisateur, nous avons rajouté la même commande sur chacun de ces boutons à un moment donné (par exemple, l'utilisateur doit cliquer sur n'importe quel bouton pour entrer dans le camion, démarrer le moteur, activer la radio, ...). Le levier de vitesse fonctionne comme son équivalent pour une véhicule réel. Il permet le passage des cinq vitesses de conduite, ainsi que de la marche arrière. Il est également doté de 8 boutons sur lesquels on pourrait rajouter des commandes spécifiques. Nous avons exploité 4 de ces boutons pour rajouter les actions de « déplacement à pied » de l'utilisateur dans l'EV : les *boutons up, down, left et right*. Les différentes pédales sont toutes les trois disposées sur un socle, dans le même ordre et pour les mêmes commandes que dans un véhicule réel.



Figure 7 : Logitech Steering Wheel G27
Source: (Kamkuimo K., Girard, & Menelas, 2020)

8.3.3 L'HEXOSKIN POUR COMMUNIQUER LE RYTHME CARDIAQUE DE L'UTILISATEUR AU SIMULATEUR

L'Hexoskin¹⁸ (voir Figure 8) est un ensemble constitué d'un petit dispositif et d'un vêtement intelligent doté de capteurs capables de récupérer en temps réel plusieurs paramètres physiologiques de l'utilisateur tels que la fréquence cardiaque, la variabilité cardiaque, la récupération cardiaque, les intervalles RR, l'électrocardiogramme, la fréquence respiratoire, le volume respiratoire, l'activité, l'accélération, les pas, la cadence et les positions de sommeil. Il dispose d'une connexion Bluetooth 3.1 et 4.1 pour assurer la liaison avec des appareils intelligents afin d'y afficher les paramètres précédents.



Figure 8 : Hexoskin

¹⁸ <https://www.hexoskin.com/>

8.3.4 UN ORDINATEUR DE BUREAU POUR L'EXPLOITATION DE CES INTERFACES

Toutes ces interfaces précédentes sont connectées à un ordinateur de bureau doté de deux écrans (voir Figure 9). Le premier écran permet de visualiser l'expérience de l'utilisateur dans l'EV, et l'autre permet d'afficher le menu 2D pour le thérapeute.



Figure 9 : Laboratoire de développement du simulateur
Source: (Kamkuimo K., Girard, & Menelas, 2020)

8.4 PRINCIPALES MÉCANIQUES

Les principales mécaniques qui découlent des primitives comportementales virtuelles précédemment décrites sont les suivantes :

- La mécanique de déplacement : certains scénarios offrent à l'utilisateur la possibilité d'explorer l'EV suivant une vue à la première personne ou à la

troisième personne. Pour ces mécaniques, l'utilisateur exploite le pavé directionnel du levier de vitesse du Logitech pour se déplacer dans les quatre directions dans l'EV.

- La mécanique de sélection : cette mécanique sera appliquée lorsque l'utilisateur aura des décisions à prendre selon des instructions textuelles qui lui seront affichées dans l'environnement. Il n'aura qu'à appuyer sur le bouton du Logitech G27 qui lui sera indiqué.
- La mécanique de conduite : il s'agit ici de la conduite proprement dite, comme l'utilisateur le ferait dans la vraie vie. Étant donné que le simulateur fonctionne en mode de transmission automatique. L'utilisateur n'aura qu'à utiliser le volant du Logitech G27 pour guider son camion, et les pédales adéquates pour avancer ou freiner.

8.5 ENVIRONNEMENTS VIRTUELS ET SCÉNARIOS

Ce simulateur propose à l'utilisateur trois environnements virtuels différents qu'il peut explorer suivant plusieurs perspectives : un environnement d'initiation et deux environnements de conduite ouverte.

8.5.1 ENVIRONNEMENT D'INITIATION

Nous avons repris le principe de l'étude précédente effectuée par Menelas et al. (2016). L'environnement d'initiation permettra au patient d'apprendre la mécanique de conduite sous une perspective féérique (le tapis volant). La scène démarre avec l'utilisateur sur un tapis volant le plaçant au-dessus de toutes les autres entités de l'EV (voir Figure 10). Il peut explorer le monde en se déplaçant sur ce tapis à l'aide du volant

de conduite. Les mécaniques de déplacement de ce tapis volant sont les mêmes que les mécaniques de conduite d'un véhicule. L'EV concerné ici est un monde de « ville et campagne ».

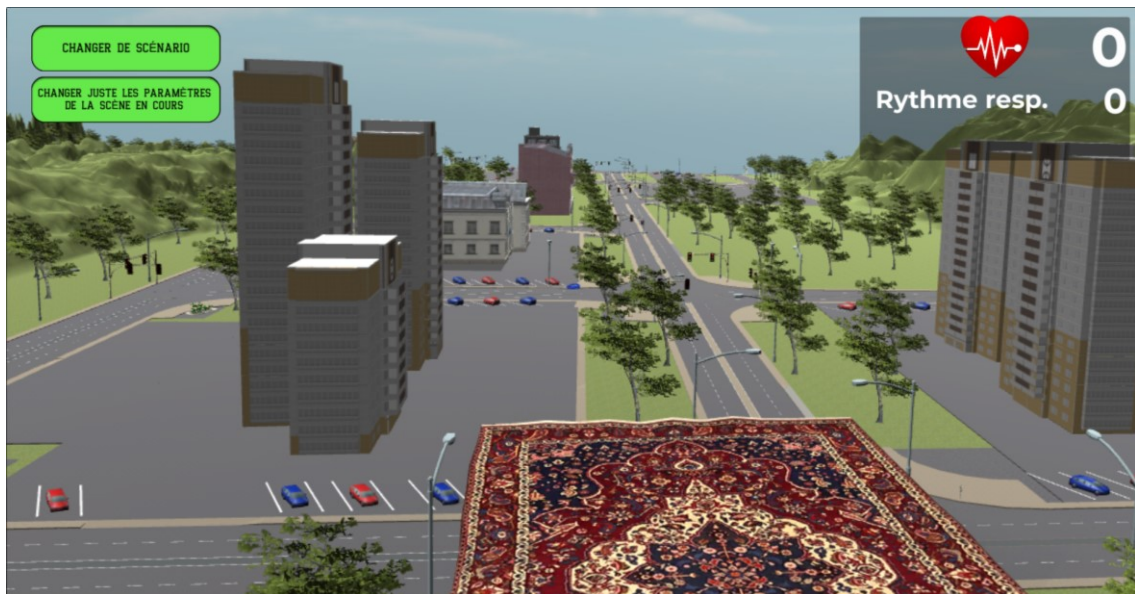


Figure 10 : Scénario de tapis volant
Source: (Kamkuimo K., Girard, & Menelas, 2020)

8.5.2 ENVIRONNEMENTS DE CONDUITE OUVERTE

Le simulateur propose deux environnements de conduite ouverte : un environnement « au bord du lac » et un environnement de « ville et campagne » (voir Figure 11).

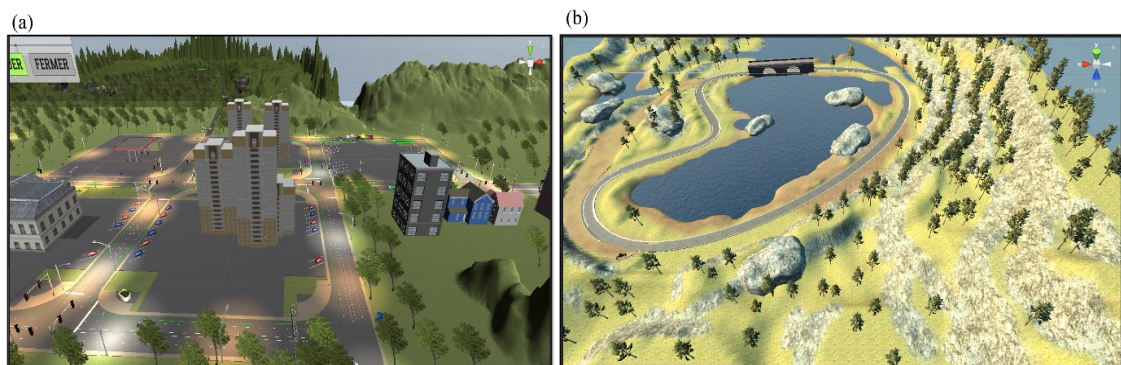


Figure 11 : Vue de dessus des principaux environnements
Source: (Kamkuimo K., Girard, & Menelas, 2020)

L'image (a) représente la vue de dessus de l'environnement de « Ville et campagne ». L'image (b) représente la vue de dessus de l'environnement « au bord du lac ».

Le processus dans chacun de ces environnements se déroule en deux phases : une phase de stationnement durant laquelle le sujet va se rapprocher des camions stationnés dans un stationnement afin de choisir le camion à conduire ; et une phase de conduite de camion dans laquelle le sujet va effectivement conduire le camion qu'il aura choisi.

- Phase de stationnement : dans cette phase, l'utilisateur doit se déplacer librement dans un stationnement contenant plusieurs camions et choisir celui qu'il voudrait conduire, c'est à ce niveau que ce dernier met en application la première mécanique (le déplacement). Lorsque l'utilisateur est proche d'un camion, les lignes de stationnement de ce camion passent en surbrillance pour lui indiquer vers lequel des camions il est en train de se diriger. Il peut alors décider d'y entrer en appuyant sur une touche du volant. Le choix du camion n'est fait que lorsque l'utilisateur décide d'y entrer. Une fois dans le camion, la phase de conduite peut commencer.
- Phase de conduite de camion : cette phase s'opère suivant une vue à la première personne (voir Figure 12). Des instructions textuelles sont données à l'utilisateur. Tout d'abord, il doit démarrer le moteur. Une fois le moteur démarré, il peut commencer la conduite. Des instructions lui sont également données pour qu'il puisse interagir avec son camion. Il peut par exemple allumer la radio.

L'environnement de « ville et campagne » offre plusieurs situations possibles relatives à la saison (été ou hiver), au type de neige en hiver (pas de chute de neige, vent léger, gros orage, tempête de neige), au temps qu'il fait en été (sans pluie ou avec pluie), au moment de la journée (aurore, crépuscule, nuit, jour) et au type de journée (journée ensoleillée ou non). En plus de cela, des IA ont été programmées pour gérer les feux de circulation et le trafic dans ces scénarios. Ces scénarios peuvent inclure des accidents à

différents points de la scène. Le système est fait de sorte que lorsque l'utilisateur agit sur l'EV il reçoit en temps réel des rétroactions significatives de ses actions. Des rétroactions sonores sont ajoutées : un son de marche lorsqu'il se déplace à pied, un son d'ouverture et de fermeture de la portière du camion lorsqu'il décide d'y rentrer, un son au démarrage du moteur, des sons de la radio, un son d'ambiance selon la saison et le temps de la journée, et le son du moteur du camion lorsqu'il conduit.

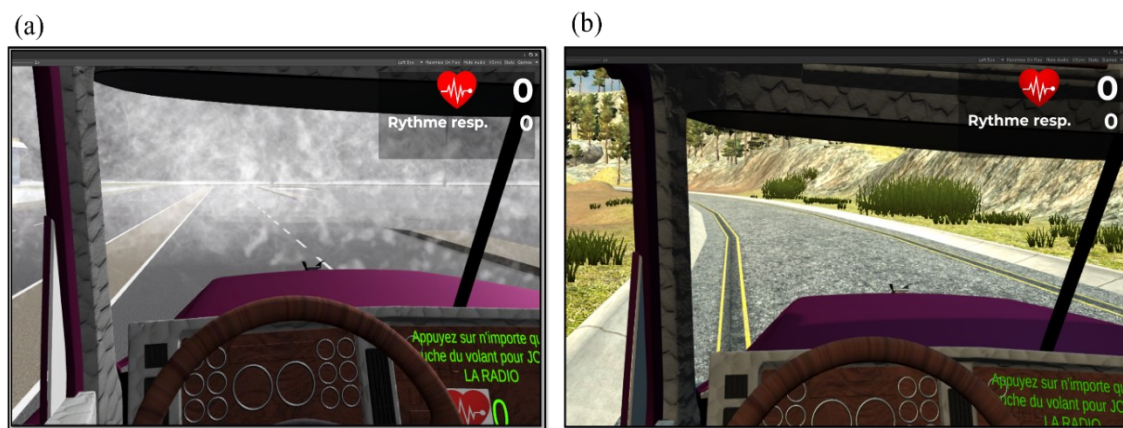


Figure 12 : Quelques captures de la vue durant la conduite

Source: (Kamkuimo K., Girard, & Menelas, 2020)

L'image a) représente la vue de la conduite dans l'environnement de « Ville et Campagne » en hiver, en pleine tempête de neige et durant le jour. L'image b) représente la vue de la conduite dans l'environnement « au bord du lac ».

8.6 CONCLUSION

Nous avons rapporté dans ce chapitre la nouvelle conception du simulateur de conduite de camion suivant le modèle de référence de la RV. Le développement a été fait avec le moteur de jeu Unity 3D (Unity3D, n.d.) qui offre un ensemble de fonctionnalités et de modules permettant le développement rapide de jeux et d'applications de réalité virtuelle. Dans le prochain chapitre, nous présentons le module d'ajustement dynamique de la difficulté qui y a été intégré.

CHAPITRE 9

MODULE D'AJUSTEMENT DYNAMIQUE DE LA DIFFICULTÉ EN FONCTION DU *FEEDBACK* PHYSIOLOGIQUE RÉCUPÉRÉ EN TEMPS RÉEL

Résumé : L'approche énaactive nous montre l'importance d'une coévolution entre le système et l'utilisateur. Nous implémentons cela à l'aide de l'ajustement dynamique de la difficulté pour offrir un équilibre approprié entre les habiletés de l'utilisateur et la difficulté des activités de l'environnement virtuel. Sachant que la fréquence cardiaque est un bon indicateur de l'état émotionnel des personnes souffrant de trouble de stress post-traumatique, nous collectons cette variable en temps réel pour proposer un système de réalité virtuelle ajusté à l'état émotionnel du sujet. Le système d'adaptation proposé peut être abordé selon trois modes : le mode *offline* qui consiste en des sélections du thérapeute avant le lancement du jeu, le mode manuel *online* pendant lequel le thérapeute peut adapter l'environnement virtuel pendant que le sujet est exposé, et le mode automatique *online* qui exécute un algorithme pour ajuster automatiquement l'environnement virtuel.

9.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous implémentons l'approche énaactive développée au CHAPITRE 7 pour le traitement du Trouble de Stress Post-Traumatique (TSPT) en utilisant la Thérapie d'Exposition par la Réalité Virtuelle (TERV). Nous le faisons en approchant notre simulateur comme un jeu sérieux (SG pour Serious Game) en Réalité Virtuelle (RV). Nous y appliquons la technique d'Ajustement Dynamique de la Difficulté (ADD) afin que l'Environnement Virtuel (EV) puisse être adapté automatiquement et en temps réel à l'état émotionnel du sujet mathématiquement et objectivement évalué (Kamkuimo K., Girard, & Menelas, 2020).

Lorsqu'il s'agit d'anxiété, les mesures physiologiques du sujet sont utilisées comme paramètres objectifs pour évaluer son état émotionnel vis-à-vis des stimuli

anxiogènes. Pour le TSPT, plusieurs études ont défini le Rythme Cardiaque (RC) du sujet comme étant un bon indicateur de son état de stress pendant la thérapie (Rothbaum et al., 2004; Walshe et al., 2005; Walshe et al., 2003). Ces études quantifient une évolution positive du patient par une diminution de sa réponse physiologique, et donc de son RC face à des stimuli associés au traumatisme. Ainsi, notre approche éactive du traitement exploitera le principe d'ADD en utilisant comme paramètre d'ajustement ce RC récupéré en temps réel à l'aide de l'Hexoskin.

Les modes d'ajustement couramment observés dans les systèmes de TERV pour le traitement du TSPT sont essentiellement manuels : le thérapeute ajuste l'EV à travers un menu qui répertorie les différents scénarios et situations possibles du monde virtuel (Rizzo et al., 2017). Dans ce chapitre, en plus des modes d'ajustement manuel, le système d'ADD proposé comprend un mode automatique online exécutant un algorithme qui adapte l'EV automatiquement et en temps réel en fonction de l'état émotionnel du patient. Cet algorithme récupère le rythme cardiaque du patient et propose une situation thérapeutique correspondant à son état de stress actuel. Une telle manière d'aborder la thérapie peut donner l'opportunité d'analyser le niveau d'immersion et de présence des patients dans l'EV et leur permettre d'auto-réguler leurs réactions physiologiques en percevant leur auto-efficacité tout en interagissant avec l'EV. Nous commençons le chapitre en analysant certains travaux qui se rapprochent de notre sujet. Ensuite, nous présentons le système d'ADD avec l'algorithme pour le mode d'ajustement automatique online que nous proposons pour un système de thérapie auto-adaptatif.

9.2 TRAVAUX RELATIFS A L'AJUSTEMENT DYNAMIQUE DE LA DIFFICULTÉ

Dans cette section, nous analysons la façon dont le *feedback* physiologique du sujet est exploité dans les systèmes d'ADD et nous discutons de la façon dont le RC est exploité dans le traitement du TSPT.

Liu et al. (2009) ont proposé une approche d'ADD qui se base sur le *feedback* affectif de l'utilisateur pour lui offrir online un niveau de difficulté adapté à son niveau d'anxiété pendant qu'il joue au jeu. Ils ont commencé par utiliser la technique d'arbre de régression pour déterminer l'état affectif du joueur en fonction d'un ensemble de caractéristiques physiologiques. Leur algorithme d'ADD utilise 03 niveaux de difficulté (*easy, moderately difficult, very difficult*) et 03 niveaux d'anxiété (*low, medium, high*). Il garde le joueur dans le niveau de difficulté *easy* tant que son niveau d'anxiété est *medium* ou *high* et le fait passer au niveau *moderately difficult* si son niveau d'Anxiété passe à *low*. Ensuite, il garde le joueur dans le niveau de difficulté *moderately difficult* tant que son niveau d'anxiété est *medium* ou *high* et le fait passer au niveau *very difficult* s'il est *low*. Si le joueur est au niveau *very difficult*, l'algo d'ADD le garde à ce niveau tant que son niveau anxiété est *low* ou *medium* et le renvoie au niveau *moderatly difficult* s'il est *high* et ainsi de suite. Les auteurs ont intégré cet algorithme au jeu *pong* afin de comparer ce système d'ADD basé sur les affects du joueur à un système d'ADD basé sur les performances. Les résultats soulignent une précision élevée en temps réel du système d'ADD basé sur les affects, une amélioration des performances des participants, un meilleur *challenge* dans le jeu, une meilleure satisfaction et un niveau d'anxiété perçu réduit chez la majorité des participants durant les sessions de jeu utilisant le modèle d'ADD basé sur les affects comparativement à celles avec un modèle d'ADD basé sur les

performances. Cette étude souligne des bénéfices de l'utilisation du *feedback* affectifs pour ajuster la difficulté d'un jeu.

Van Rooij et al. (2016) ont proposé le jeu DEEP, un jeu en RV de *biofeedback* basé sur la respiration. Il s'agit d'un SG auto-adaptatif de relaxation qui immerge le joueur dans un monde sous-marin fantastique qu'il peut explorer en se déplaçant librement. Dans ce système, le rythme respiratoire du joueur est relevé à l'aide d'un capteur et renvoyé directement au jeu qui adapte plusieurs aspects du jeu en conséquence. Un aspect d'adaptation se situe au niveau du suivi de la respiration du joueur à l'aide d'un cercle dont le diamètre varie en fonction de sa respiration. De plus, le déplacement du joueur dans le jeu est plus facile ou plus difficile selon que son rythme respiratoire est lent ou rapide. À la suite d'expériences de 07 minutes d'immersion avec 86 enfants âgés entre 8 et 12 ans, les auteurs soulignent une diminution significative de l'état d'anxiété générale des sujets évalué sur le niveau de relaxation, de satisfaction, d'ennui ou de pression. Ce résultat traduit le fait que le système DEEP puisse être valable pour limiter le risque de troubles anxieux chez les enfants.

Dans le cadre d'une formation du personnel d'urgence à l'aide d'un SG, Ninaus et al. ont évalué la faisabilité d'un système d'ADD basé sur le RC, dans lequel les joueurs devaient apprendre à gérer trois scénarios d'urgence critiques (accident de la circulation, incendie de bâtiments et accident de train) (Ninaus, Tsarava, & Moeller, 2019). Chaque scénario avait trois niveaux de difficulté (facile, moyen et difficile). Les auteurs ont évalué les préférences des participants pour les versions non adaptative et adaptative du jeu. Dans la version non adaptative, les participants devaient jouer aux scénarios de jeu normalement dans le temps imparti. Dans la version adaptative, les scénarios de jeu ont

été ajustés afin que le jeu devienne plus difficile si la fréquence cardiaque du joueur descendait en dessous d'un certain seuil prédéfini et plus facile si la fréquence cardiaque dépassait ce seuil. Leur étude a révélé que les joueurs trouvaient la version adaptative du jeu plus excitante, fascinante, stimulante et engageante. Ces résultats montrent donc que la fréquence cardiaque peut être un bon paramètre physiologique pour optimiser les systèmes d'ADD dans un apprentissage basé sur le jeu.

Comme dans les études examinées ci-dessus, il est possible de considérer des paramètres autres que les performances de l'utilisateur dans le jeu. On pourrait s'intéresser aux affects du sujet à travers des mesures plus objectives telles que le RC ou la fréquence respiratoire. En ce qui concerne le TSPT, le RC s'est avéré être un indicateur objectif du niveau de stress du patient en présence d'indices de trauma. Premièrement, il permet de déterminer le risque de développer le TSPT suite à une situation traumatique (Bryant, 2016). Deuxièmement, les valeurs du RC des patients récupérées à intervalles réguliers au cours du traitement peuvent être utilisées pour évaluer l'évolution de leur état émotionnel (Wood et al., 2009). Dans ce cas, le résultat positif du traitement est l'atténuation du RC du sujet face à des stimuli anxiogènes. Cette atténuation correspondrait à une diminution de la réponse à des stimuli anxiogènes (Foa et al., 2007; Wood et al., 2009). Par conséquent, dans ce chapitre, nous automatisons ce principe en utilisant l'ADD.

9.3 DÉVELOPPEMENT DU MODULE D'AJUSTEMENT DYNAMIQUE DE LA DIFFICULTÉ

Dans notre système, nous avons développé un module qui est chargé de relier le simulateur et l'Hexoskin pour collecter le RC de l'utilisateur en temps réel. Le module

d'ADD peut être abordé de trois manières : ajustement manuel offline, ajustement manuel online et ajustement automatique online. Pour les ajustements manuels, le système offre au thérapeute un menu facile d'utilisation (voir Figure 13) à partir duquel il peut sélectionner des environnements et des scénarios avec éventuellement des accidents, en fonction des caractéristiques du patient. Pour l'ajustement offline, les sélections sont effectuées immédiatement après le lancement du simulateur. Ainsi, dans ce mode d'ajustement, en plus du RC du patient, le thérapeute peut utiliser les données dont il dispose sur les antécédents du patient et son évolution lors des séances précédentes pour choisir l'environnement et le scénario le plus approprié pour la séance en cours. En mode manuel online, le thérapeute a la possibilité de modifier manuellement l'environnement ou le scénario en fonction de ses observations de l'état du patient pendant que ce dernier est exposé. Pour le mode automatique online, le système utilise un algorithme d'ADD qui modifie automatiquement l'environnement ou le scénario en fonction de l'état émotionnel du patient, tel qu'évalué par son RC. Ainsi, le RC du patient est collecté en temps réel et transmis au simulateur grâce à une application dédiée. L'algorithme utilise donc ce RC et la situation actuelle de l'EV pour ajuster les scénarios et/ou l'EV. Dans la section suivante, nous détaillons comment ce dernier mode est implémenté.



Figure 13 : Menu facile d'utilisation pour le thérapeute

Source: (Kamkuimo K., Girard, & Menelas, 2020)

La section de gauche présente les différentes situations que le thérapeute peut sélectionner en cochant la case correspondante. La section de droite est une fenêtre qui n'est activée que lorsque le thérapeute clique sur le bouton « Ajouter un accident » (bouton orange) dans la section de gauche. Elle montre la carte en vue de dessus de l'environnement « ville et campagne », avec les cases à cocher (en orange) pour les différentes positions d'accident. Par défaut, les accidents sont désactivés dans cet environnement. Si le thérapeute coche une position d'accident sur cette carte, l'accident correspondant sera activé dans l'environnement virtuel après validation.

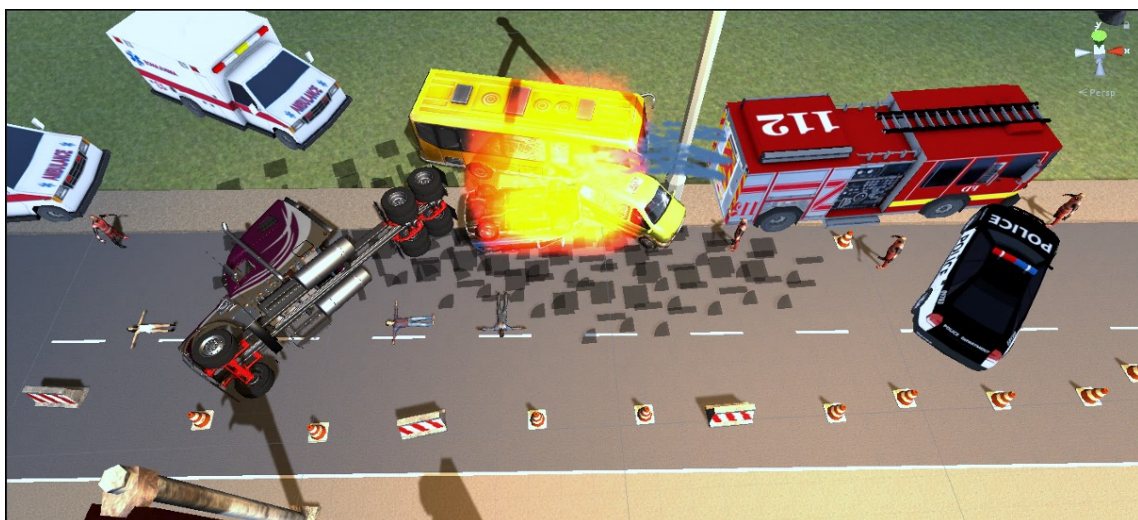


Figure 14 : Exemple d'accident

Source: (Kamkuimo K., Girard, & Menelas, 2020)

9.4 CATÉGORISATION DES NIVEAUX D'ANXIÉTÉ

Le but de la thérapie d'exposition prolongée basé sur la surveillance physiologique à travers le RC est que le patient puisse atteindre un RC relativement normal face à des situations qui pourraient provoquer une forte anxiété (Rothbaum, Ruef, Litz, Han, & Hodges, 2003; Walshe et al., 2003; Wood et al., 2009).

Nous avons commencé par répertorier les différentes situations de notre système que nous avons classé par niveau d'anxiété. Nous nous sommes basés sur l'étude du département des transports des États-Unis (2016) qui présente les statistiques des causes des accidents de la route. Mis à part ceux causés par les conditions internes propres au conducteur, environ 21% d'accidents de la route aux USA ont des causes associées aux mauvaises conditions climatiques. Près de 71% dans cette catégorie sont relié à la pluie et 26% à la neige selon l'ampleur. Les mauvaises conditions climatiques peuvent affecter notamment la visibilité du conducteur, la vitesse du trafic, le temps de voyage, l'obstruction des voies et la stabilité du véhicule. Nous nous sommes basés sur ces observations pour établir les niveaux d'anxiété que pourrait ressentir le patient en fonction des scénarios courants. Ces informations statistiques nous ont permis de définir trois principaux niveaux d'anxiété de 1 à 3. Un niveau d'anxiété 1 signifie que la situation concernée peut évoquer une faible anxiété chez le sujet et un niveau d'anxiété 3 signifie que la situation concernée peut évoquer une forte anxiété chez le sujet. Chaque niveau d'anxiété est associé à un EV et/ou à un scénario.

- Scénarios de niveau d'anxiété 1
 - L'environnement « au bord du lac ».

- L'environnement « ville et campagne », en hiver comme en été, sans neige et sans pluie, à l'aurore, au crépuscule, le jour ou la nuit.
- L'environnement « ville et campagne », en hiver, avec de faibles chutes de neige, pendant la journée.
- Scénarios de niveau d'anxiété 2
 - L'environnement « ville et campagne », avec de faibles chutes de neige, à l'aurore, au crépuscule ou la nuit.
 - L'environnement « ville et campagne », avec de la pluie, pendant la journée.
- Scénarios de niveau d'anxiété 3
 - L'environnement « ville et campagne », en hiver, avec de violents orages ou tempêtes de neige, à l'aurore, au crépuscule, le jour ou la nuit.
 - L'environnement « ville et campagne » avec de la pluie, à l'aurore, au crépuscule ou la nuit.

Le système est conçu pour permettre l'ajout de nouveaux stimuli anxiogènes dans l'environnement « ville et campagne », comme les accidents. La présence d'accidents dans le scénario augmentera de 1 le niveau d'anxiété du scénario actuel, quel que soit le nombre d'accidents sélectionnés par le thérapeute sur la carte de la Figure 13. En effet, avoir plusieurs positions d'accidents ne permet que d'augmenter les chances que le patient en rencontre au moins sur son chemin.

9.5 ALGORITHME D'ADD

L'algorithme d'ADD opère en deux principales étapes : la première consiste à évaluer l'état émotionnel du patient en fonction de son RC et la seconde consiste à utiliser

cette information pour adapter l'EV à l'état actuel du patient. Pour se faire, il prend en paramètres un niveau d'anxiété ainsi que le RC actuel du patient, et s'exécute jusqu'à ce que le patient atteigne une situation de niveau maximal d'anxiété en gardant un RC relativement normal. Les variables utilisées par cet algorithme sont les suivantes :

- `A` : entier non signé utilisé pour stocker le niveau d'anxiété de la situation actuelle dans l'EV. La valeur initiale de `A` est fixée en fonction des paramètres sélectionnés par le thérapeute au début de la séance. Par exemple, si au début le thérapeute sélectionne l'environnement « au bord du lac », `A` est mis à 1.
- `maxA` : entier non signé utilisé pour stocker le niveau d'anxiété de la situation la plus anxiogène pour le patient parmi les principaux scénarios définis.
- `m` : entier non signé équivalent au nombre d'évènements anxiogènes supplémentaires ajoutés aux situations prédéfinies. Par exemple, ce paramètre aura une valeur de 1 si le thérapeute ajoute un accident au scénario initial sélectionné.
- `time` : entier non signé utilisé pour stocker le temps que le sujet doit passer dans une situation à essayer de réguler sa réponse physiologique au moyen de ses interactions avec l'EV. Conformément aux études antérieures évaluant le RC du patient pendant la thérapie d'exposition (Wood et al., 2009), nous avons fixé la valeur de `time` à 5 minutes.
- `HR` : entier non signé utilisé pour stocker le RC actuel du patient, transmis au simulateur par l'Hexoskin.
- `normalHR` : entier non signé utilisé pour stocker le RC du patient récupéré au départ. Cette variable constitue le RC du patient pour la séance en cours et peut varier d'une séance à l'autre.

- r : entier non signé permettant une flexibilité dans la valeur du RC normal du patient. La variable r peut prendre une valeur inférieure ou égale à 40 bpm car le RC normal d'un adulte au repos varie entre 60 et 100 bpm (AHA, 2015). Elle peut aussi être défini par le thérapeute au début de l'exposition, en fonction de sa variation lors des séances précédentes.

Le corps de notre algorithme d'ADD est le suivant :

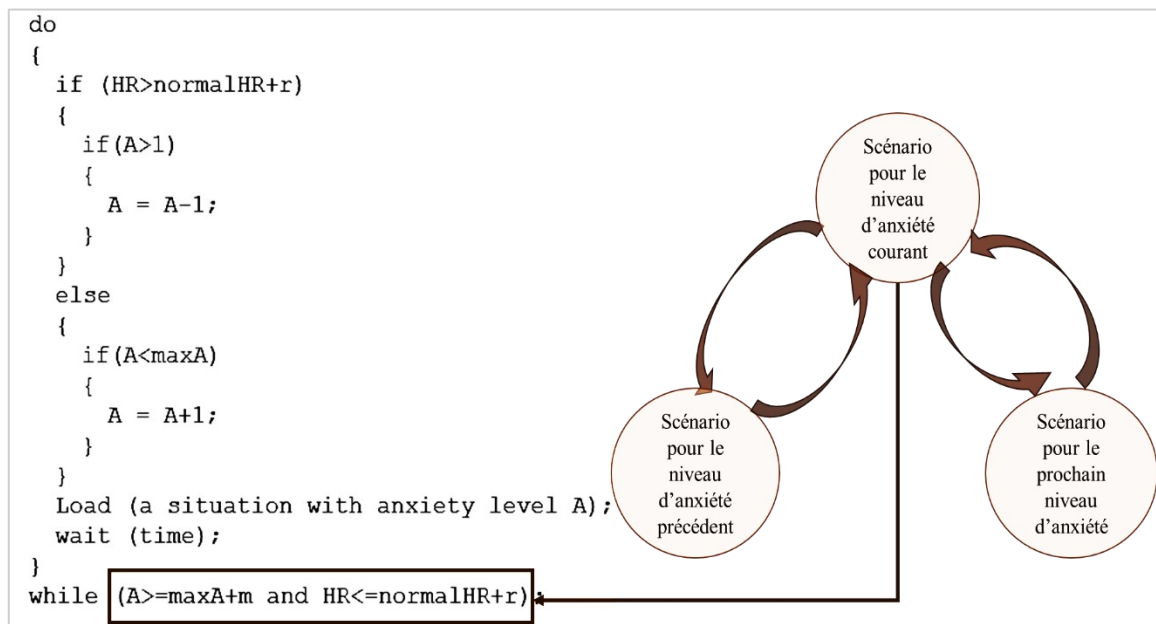


Figure 15 : Algorithme d'ADD et diagramme d'état associé
(Kamkuimo K., Girard, & Menelas, 2020)

En exécutant cet algorithme, une récupération après traitement correspondrait mathématiquement à $A = \text{maxA}$ et $\text{HR} \leq \text{normalHR} + r$.

Bien que cet algorithme offre un simulateur auto-adaptatif pour la TERV, la présence du thérapeute reste cruciale pendant le traitement. Ainsi, parallèlement au mode d'ADD automatique, le simulateur offre au thérapeute la possibilité de s'assurer que des changements adéquats sont apportés à l'EV. Nous avons également donné au thérapeute la possibilité d'activer ou de désactiver le mode d'ADD automatique *online*. Un exemple

de cas pratique ou il pourrait être amené à le faire serait celui où $A = 3$ et $HR > normalHR + r$; tandis que l'algorithme d'ADD est en cours d'exécution, le thérapeute peut décider de l'interrompre et de passer d'une situation de niveau d'anxiété $A = 3$ à une situation de niveau d'anxiété $A = 1$ afin de stabiliser rapidement le RC du patient. Il peut également décider de garder le patient plus longtemps que le temps alloué dans une certaine situation, afin de l'aider à apprendre des stratégies d'adaptation à son environnement. Le rôle du thérapeute sera aussi de décider ou non d'arrêter l'exposition en fonction de l'état du patient.

9.6 CONCLUSION

L'évaluation de l'efficacité du traitement lors des TERV se fait généralement soit par des mesures subjectives, soit en observant le RC du patient à des intervalles de temps réguliers. Dans ce chapitre, nous avons proposé l'intégration dans notre simulateur de conduite de camion en RV, d'un système d'ADD pouvant être approché suivant trois modes: (1) le mode *offline*, qui consiste à configurer le système en fonction des caractéristiques du patient avant le lancement du simulateur; (2) le mode manuel *online*, qui consiste en la modification par le thérapeute des scénarios pendant l'exposition; et (3) le mode automatique *online*, qui utilise un algorithme pour ajuster dynamiquement le scénario en fonction de l'état émotionnel actuel du patient. Dans ce dernier mode, le RC du patient est récupéré en temps réel à l'aide de l'Hexoskin et inclus directement dans le système à l'aide d'un module développé à cet effet. La valeur du RC est ensuite utilisée pour ajuster dynamiquement le système pendant les séances d'exposition afin qu'à chaque étape de la thérapie, le sujet puisse avoir une meilleure expérience grâce à des scénarios adaptés à son état émotionnel courant.

PARTIE 3

ÉVALUATION, RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

Résumé : Dans cette dernière partie de notre thèse, nous présentons les tests d'utilisabilité qui ont été effectués avec des participants sains, c'est-à-dire ne présentant ni les symptômes de trouble de stress post-traumatique, ni d'autres symptômes de troubles mentaux. Le but de ces tests était de vérifier que l'outil répond bien aux exigences de nos approches et d'une application de réalité virtuelle en termes d'interaction d'immersion et de présence. Pour cela l'approche utilisée a combiné une évaluation heuristique à d'autres formes d'évaluation permettant de cibler spécifiquement l'engagement naturel de l'utilisateur dans l'environnement virtuel, la facilité d'utilisation de l'outil, le naturalisme des interactions, la qualité de l'exploration visuelle, la facilité d'apprentissage des interfaces et les performances des utilisateurs dans l'exécution des tâches. Les résultats obtenus sont satisfaisants sur l'ensemble des points évalués. Des suggestions d'amélioration ont été émises par les participants. L'outil sera réajusté en fonction de cela pour les utilisateurs finaux (camionneurs souffrant de trouble de stress post-traumatique à la suite d'un accident de la route).

CHAPITRE 10

ÉVALUATION ET RÉSULTATS

Résumé : Le but du test d'utilisabilité était de se rassurer que le dispositif répondrait bien aux attentes des utilisateurs en termes d'interfaces, de qualité des interactions, de réponses de l'environnement virtuel, d'immersion et de présence. Dans ce chapitre, nous décrivons la procédure d'évaluation utilisée et les résultats obtenus.

10.1 ÉVALUATION

10.1.1 CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUE

Pour nos évaluations, nous avons reçu une approbation d'éthique pour les tests avec les êtres humains, délivrée par le comité d'éthique de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). Cette demande a initialement été faite avec comme public visé les camionneurs souffrant de trouble de Stress Post-Traumatique (TSPT). Dans un de test d'utilisabilité de l'outil, nous avons étendu la demande pour des expérimentations avec des personnes qui ne souffrent ni de TSPT, ni d'aucun autre trouble mental. Cette demande a été validée par le comité d'éthique de l'UQAC. Vous trouverez cette approbation éthique en **Annexe 1**.

10.1.2 APPROCHES D'ÉVALUATION

10.1.2.1 GÉNÉRALITÉS

Il existe une réelle nécessité d'effectuer des tests d'utilisabilité pour les applications de Réalité Virtuelle (RV) destinées à la santé (Zhang et al., 2020), car les utilisateurs finaux (cliniciens et patients) ne sont nécessairement pas familiarisés avec ce

type précis de technologies et peuvent aussi avoir des besoins particuliers du fait de leurs âges, leurs capacités et leur état de santé. De plus, il ne faut pas oublier les cyber-malaises que peut générer l'utilisation des technologies de la RV (Nichols & Patel, 2002). Bien que les applications de RV soient de plus en plus utilisées, on retrouve très peu de lignes directrices suggérées pour leur évaluation (Hvannberg, Halldórsdóttir, & Rudinsky, 2012). À ce jour, quelques approches d'évaluation d'utilisabilité ont été proposées et classifiées selon des exigences spécifiques visées par l'évaluation, des aspects de RV qui sont considérés, du type de mesures utilisées et du type de résultat que produit l'évaluation (Zhang et al., 2020). Le Tableau 2 est notre traduction de la proposition de Zhang et al. (2020) qui récapitule ces différentes approches d'évaluation.

Tableau 2 : Approches d'évaluation des applications de RV

Notre traduction du tableau de Zhang et al. (Zhang et al., 2020)

©Timothy Zhang, Richard Booth, Royce Jean-Louis, Ryan Chan, Anthony Yeung, David Gratzler, Gillian Strudwick. Tableau adapté en accord avec la licence Creative Commons.

Approche	Exigences d'évaluation	Aspects RV évalués	Type de mesure utilisée	Type de résultats
Procédure de tâche ou cognitive pas à pas (Costalli, Marucci, Mori, & Paterno, 2001; Sutcliffe & Kaur, 2000)	Utilisateurs externes représentatifs, tâche ou scénario développé et équipement d'enregistrement et de chronométrage.	Navigation dans l'environnement, interaction objet et interaction utilisateur-système.	Performance dans les tâches et <i>feedback</i> utilisateur.	Discret et descriptif.
Évaluation graphique (McMahan, Bowman, Zielinski, & Brady, 2012)	Plusieurs environnements graphiques pertinents, équipement d'enregistrement, questionnaires et guides d'entretien.	Qualité des graphiques et des rendus d'images	<i>Feedback</i> utilisateur	Descriptif

Questionnaires et entretiens post hoc (Castilla et al., 2013)	Utilisateurs externes, questionnaires ou guides d'entretien et matériel d'enregistrement.	Non spécifique	<i>Feedback</i> utilisateur	Descriptif
Évaluation des performances physiques (Rezazadeh, Firoozabadi, & Wang, 2011)	Utilisateurs externes, tâche ou scénario développé et, éventuellement un équipement d'enregistrement et de chronométrage.	Immersion physique et performances en RV.	Performances dans les tâches, mesures des performances du système et <i>feedback</i> des utilisateurs	Discret et descriptif
Évaluation de l'interface utilisateur (Chin, Diehl, & Norman, 1988; Kasurinen, 2017; Sutcliffe & Kaur, 2000)	Tâche ou scénario développé et, éventuellement un équipement d'enregistrement et de chronométrage, ainsi que des questionnaires et guides d'entretien.	Intégration de l'environnement virtuel, des dispositifs et des performances en RV.	Performance dans les tâches et <i>feedback</i> utilisateur.	Discret et descriptif
Évaluation Heuristique¹⁹ (Nielsen, 1994; Sutcliffe & Deol Kaur, 2008; Sutcliffe & Kaur, 2000)	Utilisateurs expérimentés, tâche ou scénario développé, questionnaires, guides d'entretien et, éventuellement un équipement d'enregistrement.	Divers	Une liste d'heuristiques d'évaluation	Descriptif

10.1.2.2 APPROCHE UTILISÉ POUR L'ÉVALUATION DE NOTRE SIMULATEUR

L'approche d'évaluation que nous avons utilisée a consisté à combiner les spécificités de cinq des six approches du Tableau 2. (1) L'approche de **procédure de tâche ou cognitive pas à pas** nous a permis de viser précisément la navigation et les interactions de l'utilisateur avec l'EV. (2) Nous avons également jugé nécessaire de

¹⁹ « *Heuristic evaluation is an inspection technique where evaluators explore an interface using a set of usability principles, called heuristics* » (Pinelle, Wong, & Stach, 2008).

mettre l'accent sur l'évaluation des graphiques et des rendus d'images tels que stipulé par l'approche d'**évaluation graphique**. (3) Nous avons aussi exploité entièrement les principes de l'approche d'**évaluation des performances physique** car, conformément aux directives de cette approche, notre évaluation a été faite avec des utilisateurs externes qui ne sont pas les utilisateurs finaux du système, mais desquels nous pouvons avoir des retours significatifs sur l'évaluation de la tâche et des scénarios développés, ainsi que de l'immersion physique et des performances de l'utilisateur en EV. (4) L'utilisation de l'approche d'**évaluation de l'interface utilisateur** nous a permis de cibler spécifiquement la qualité des dispositifs d'affichage et de contrôle, et les performances de l'utilisateur quant aux interactions avec ces dispositifs en EV. (5) Nous avons enfin considéré l'ensemble des **douze heuristiques d'évaluation d'une application de RV** proposées par Sutcliffe et Gault (2004). En se basant sur les travaux d'autres auteurs proposant des critères d'immersion et de présence (Slater & Wilbur, 1997; Witmer & Singer, 1998), des recommandations principales pour la définition des tâches utilisateur (Johnson, 1998), une taxonomie d'utilisabilité des applications de RV (Gabbard, 1997), et des heuristiques générales pour les interfaces (Nielsen, 1994), Sutcliffe et Gault ont défini un ensemble de douze heuristiques permettant d'évaluer l'utilisabilité des applications de RV (Sutcliffe & Gault, 2004). Les critères considérés concernent l'engagement naturel de l'utilisateur, la compatibilité entre les activités proposées et ses tâches habituelles, l'expression naturelle de l'action, la coordination étroite entre l'action de l'utilisateur et ses effets sur l'EV, la rétroaction réaliste de l'EV, les perspectives fidèles associées aux mouvements de la tête, l'aide à la navigation et à l'orientation dans l'EV, les points d'entrée et de sortie clairs de l'EV, les écarts cohérents en cas d'utilisation de métaphores, l'aide à l'apprentissage, et le sentiment de présence (Sutcliffe & Gault, 2004).

Finalement, nous avons élaboré deux questionnaires détaillés et simples de compréhension contenant des questions de conformité pour chaque aspect de RV devant être évalué (voir Annexe 3 et Annexe 4).

10.1.3 RECRUTEMENT

Le recrutement s'est fait autant de manière formelle (envoi de courriels) que de manière informelle (bouche-à-oreille). Pour être accepté comme participant à l'évaluation, le sujet ne devait souffrir ni de TSPT ni d'autres troubles mentaux connus. Il devait également être titulaire d'un permis de conduire valide. Nous avons eu au total huit participants, dont sept hommes et une femme. Trois participants avaient un âge compris entre vingt et trente ans, trois autres avaient un âge compris entre trente-et-un à quarante ans, et les deux derniers avaient un âge compris entre quarante-et-un à cinquante ans. Un participant avait une expérience en conduite de poids lourd. Deux autres avaient déjà utilisé un casque de réalité virtuelle.

10.1.4 LIEU D'ÉVALUATION ET PERSONNES PRÉSENTES

Les évaluations ont été menées dans notre laboratoire de l'UQAC, où a été développé le simulateur. Il peut accueillir jusqu'à cinq personnes à la fois. Les personnes présentes dans la salle à un instant donné étaient : le participant et moi-même.

10.1.5 INSTRUMENTS DE MESURE

Nous avons utilisé les instruments de mesure suivants :

- **Une feuille de profil** : elle a permis de prendre les informations de profil du participant. À partir de ce questionnaire, nous avons recueilli les informations comme le sexe du participant, sa tranche d'âge, l'expérience ou non avec l'utilisation des dispositifs de RV, la possession ou non d'un permis de conduire, l'expérience ou non en conduite de poids lourd, et la présence ou non de troubles mentaux connus. Vous trouverez cette feuille en **Annexe 2**.
- **Un questionnaire de présence** : nous nous sommes appuyés sur le célèbre questionnaire de présence de Witmer et Singer (1998) pour élaborer un questionnaire de présence adapté aux objectifs de notre système. Le questionnaire élaboré a douze questions permettant d'évaluer le niveau de contrôle du sujet sur l'EV, les retours de l'EV, l'engagement dans l'EV, le niveau de réalisme perçu, le niveau de distraction créé par les mécaniques et la perte de la notion du temps. Pour chaque question, le participant devait donner son niveau d'appréciation sur une échelle allant de 0 (pour pas du tout) à 10 (pour totalement). Vous trouverez ce questionnaire de présence en **Annexe 3**.
- **Un questionnaire d'évaluation de la qualité de l'outil et des interactions** : ce questionnaire nous a permis de prendre en compte le ressenti des utilisateurs vis-à-vis de plusieurs paramètres dont la qualité des dispositifs d'affichage et de contrôle, la facilité d'apprentissage, le réalisme des interactions, l'intuitivité des interactions proposées, l'importance des retours sonores, et enfin l'expérience globale en termes d'interactions. Pour chaque question, le participant devait donner son niveau d'appréciation sur une échelle allant de 0 (pour pas du tout) à 10 (pour totalement). Vous trouverez ce questionnaire en **Annexe 4**.

- **Un questionnaire de suggestions** : ce questionnaire a permis au participant de proposer, s'il y a lieu, des suggestions d'amélioration de l'outil. Vous trouverez ce questionnaire en **Annexe 5**.

10.1.6 DÉROULEMENT D'UNE SÉANCE D'ÉVALUATION

Une séance d'évaluation se déroulait suivant les trois étapes suivantes :

Étape 1 : Avant l'évaluation

À la suite de l'accueil du participant dans le laboratoire, nous lui avons expliqué notre projet de recherche et lui avons donné plus de détails sur la raison de sa participation. Nous lui avons également présenté explicitement comment le test allait se dérouler et quel devait être son rôle avant, pendant et après. Après cela, il pouvait signer le formulaire de consentement. Ensuite, le participant a rempli la feuille de profil (voir Annexe 2). Nous l'avons ensuite bien positionné face au dispositif de conduite, nous avons installé le casque de RV sur sa tête et lancé la simulation (voir Figure 16).



Figure 16 : Un participant à l'évaluation
Scène de conduite : « au bord du lac »

Étape 2 : Pendant l'évaluation

Pendant le test, le participant devait majoritairement suivre toutes les instructions, essentiellement textuelles, données dans l'EV. Notre rôle était de paramétrer au fur et à mesure les scénarios de l'EV. Pour ce faire, nous avons préalablement établi une liste des différentes situations à tester :

- Été le jour;
- Été à l'aurore, au crépuscule ou la nuit;
- Hiver le jour et sans chutes de neige;
- Hiver le jour avec vent léger;
- Hiver le jour avec gros orage ou tempête de neige;
- Hiver la nuit et sans chutes de neige;
- Hiver la nuit avec vent léger;
- Hiver la nuit avec gros orage ou tempête de neige;
- Conduite au bord du lac;
- Été le jour sans pluie;
- Été la nuit sans pluie;
- Été le jour avec pluie;
- Été la nuit avec pluie;
- Hiver sans chutes de neige et le jour;
- Hiver sans chutes de neige la nuit;
- Hiver avec vent léger le jour;
- Hiver avec vent léger la nuit;
- Hiver avec gros orage ou tempête de neige le jour;
- Hiver avec gros orage ou tempête de neige la nuit.



Figure 17 : Un autre participant à l'évaluation
Situation de conduite : « ville et Campagne », en été et pendant le jour

Étape 3 : Après l'évaluation

Après le test, le participant était invité à remplir les questionnaires d'évaluation d'immersion/présence, d'interaction et de la qualité globale de l'outil. Nous présentons ci-dessous les résultats de cette évaluation.

10.2 RÉSULTATS

Le Tableau 3 de la prochaine page récapitule de manière détaillée les résultats obtenus. Les symboles P_i , \bar{x} et σ sont mis pour « participant numéro i », « moyenne » et « écart-type » respectivement. Pour chaque participant P_i , nous appelons x_i la valeur de son score d'évaluation pour une question donnée.

Le diagramme de la Figure 18 donne un aperçu rapide de la tendance centrale et de la dispersion des scores d'évaluation pour chaque heuristique considérée.

Nous avons recueilli des commentaires de participants pour effectuer des améliorations de l'outil avant son exploitation pour les applications cliniques. Ils ont suggéré entre autres de :

- Ajouter un avatar sur le siège chauffeur pour que le sujet ait l'impression d'être physiquement présent dans le camion ;
- Ajouter des piétons dans l'EV ;
- Ajouter des pédales virtuelles dans l'EV ;
- Améliorer l'intelligence artificielle des véhicules impliqués dans le trafic dans l'EV ;
- Ajouter de la musique à la radio ;
- Ajouter un tableau de bord détaillé ainsi que des clignotants.

Tableau 3 : Résultats d'évaluation d'utilisabilité

HEURISTIQUE	QUESTIONS DE CONFORMITE	SCORES DES PARTICIPANTS								\bar{x}	σ
		P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈		
H1- Engagement naturel	À quel point vos sens étaient-ils engagés dans la simulation ?	10	9	10	5	10	10	9	10	9,12	1,61
	À quel point avez-vous été impliqué dans la tâche expérimentale au point de perdre la notion du temps ?	10	0	10	6	7	10	8	9	7,5	3,16
	À quel point étiez-vous concentrés sur les activités au lieu des mécaniques ?	10	9	9	9	7	10	8	8	8,75	0,96
	GLOBAL	10	6	9,6	6,6	8	10	8,3	9	8,45	1,41
H2- Compatibilité avec la tâche et le domaine de l'utilisateur	À quel point avez-vous pu avoir le contrôle sur les événements ?	9	10	10	6	8	9	9	8	8,62	1,21
	GLOBAL	9	10	10	6	8	9	9	8	8,62	1,21
H3- Expression naturelle de l'action	Connaissez-vous les dispositifs d'affichage et de contrôle avant le test ?	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	-	-
	À quel point votre déplacement dans l'environnement virtuel était-il naturel ?	9	7	10	8	10	9	8	7	8,5	1,11
	À quel point les dispositifs utilisés (casque, volant de course) étaient-ils intuitifs pour vos interactions avec l'environnement virtuel ?	10	10	9	9	10	10	9	10	9,62	0,48
	GLOBAL	9,5	8,5	9,5	8,5	10	9,5	8,5	8,5	9,06	0,58
	À quel point l'environnement était-il réactif aux actions que vous avez effectuées ?	8	10	10	8	6	10	10	9	8,87	1,36

H4- Coordination étroite de l'action et de la représentation.	GLOBAL	8	10	10	8	6	10	10	9	8,87	1,36
H5- Rétroaction réaliste	À quel point les interactions disponibles ont-ils permis d'améliorer votre réalisme perçu ?	10	9	10	10	7	10	8	10	9,25	1,08
	À quel point le retour sonore a amélioré votre expérience ?	10	10	9	8	8	10	8	10	9,12	0,92
	À quel point vos interactions avec l'environnement vous ont semblé intuitifs et naturels ?	10	8	8	10	8	10	10	10	9,25	0,96
	GLOBAL	10	9	9	9,3	7,6	10	8,7	10	9,20	0,76
H6- Perspectives fidèles	À quel point les aspects visuels de l'environnement virtuel vous ont fait vous sentir impliqués dans l'environnement ?	10	10	10	10	10	10	8	9	9,62	0,69
	À quel point la qualité de l'affichage visuel était-elle agréable dans l'exécution des tâches assignées ou des activités requises ?	10	7	9	10	7	9	9	8	8,62	1,11
	À quel point l'exploration visuelle vous a-t-elle paru réaliste ?	10	7	10	10	10	9	8	9	9,12	1,05
	À quel point avez-vous pu examiner des objets de près ?	10	8	10	9	8	10	8	9	9	0,86
	GLOBAL	10	7,3	9,6	9,6	8,3	9,3	8,3	8,6	8,91	0,84
H7- Aide à la navigation et à l'orientation.	Cette heuristique n'a pas été évaluée explicitement, mais a été prise en compte dans la conception. En effet, dans l'environnement de lac, car il y a un seul circuit fermé sur lequel l'utilisateur peut conduire. L'environnement de ville et campagne est assez simple. Néanmoins, le processus dans cet environnement commence par la conduite d'un tapis volant. Comme nous l'avons souligné plus tôt dans ce document de thèse (voir section 8.5.1), cela donne aussi la possibilité à l'utilisateur de connaître son environnement en l'explorant en vue de dessus.										
	GLOBAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

H8- Points d'entrée et de sortie clairs	Cette heuristique n'a pas été explicitement évaluée, mais a été prise en compte dans la conception. En effet, pour le scénario de tapis volant, la position initiale de l'utilisateur est sur le tapis statique. Pour les scénarios de conduite, la position initiale de l'utilisateur est debout, face à la portière du côté chauffeur de son camion. Pour sortir du monde virtuel, on arrête la simulation et l'utilisateur enlève le casque de réalité virtuelle.											
	GLOBAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H9- Écarts cohérents	À quel point les mécaniques d'interaction proposées par l'outil étaient-elles faciles de prise en main ?	10	9	9	7	9	10	9	10	9,12	0,92	
	À quel point les mécaniques de contrôle <u>n'</u> étaient-elles <u>pas</u> distrayantes ?	9	9	9	7	7	10	8	10	8,62	1,11	
	GLOBAL	9,5	9	9	7	8	10	8,5	10	8,87	0,96	
H10- Aide à l'apprentissage	La principale aide à l'apprentissage dans notre simulateur consiste en des instructions textuelles.											
	À quel point l'outil était-il facile de prise en main?	10	9	9	7	9	10	9	10	9,12	0,92	
	GLOBAL	10	9	9	7	9	10	9	10	9,12	0,92	
H11- Tour à tour clair	Sans objet	Dans notre simulateur, les tâches du système et de l'utilisateur sont clairement définies et la tâche de l'un n'empiète pas sur celle de l'autre.										
	GLOBAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
H12- Sentiment de présence	Évalué à l'aide d'un questionnaire de présence à dix questions adapté pour notre simulateur à partir du questionnaire de présence de Witmer et Singer (Witmer & Singer, 1998).											
	GLOBAL	9,5	7,8	9,7	8,1	8,3	8,8	8,5	8,6	8,70	0,62	
Évaluation de l'expérience globale	À quel point évaluez-vous votre expérience globale ?	10	9	10	8	8	10	8	10	9,12	0,92	
	GLOBAL	10	9	10	8	8	10	8	10	9,12	0,92	

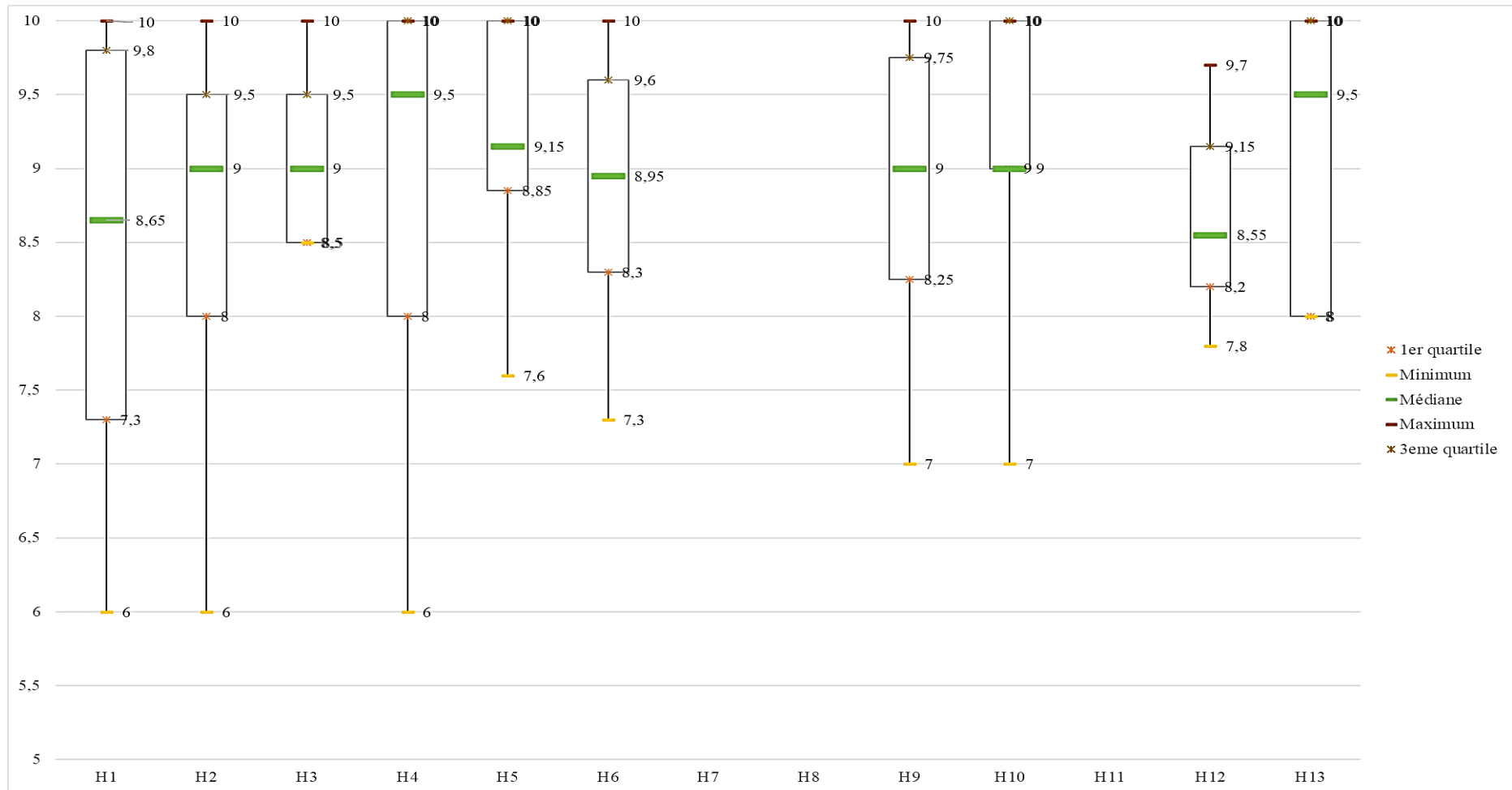


Figure 18 : Distribution des scores pour chaque heuristique.

10.3 DISCUSSION

Nous allons commencer cette section par la présentation d'une étude ayant fait l'évaluation d'un simulateur de conduite de véhicule. Ensuite, nous confronterons les résultats obtenus par cette étude pour tirer des conclusions quant à la nôtre.

10.3.1 PRÉSENTATION D'UNE ÉTUDE SIMILAIRE EFFECTUANT L'ÉVALUATION D'UN SIMULATEUR DE CONDUITE

Une application similaire à notre simulateur de conduite de camion a été rapportée par Sutcliffe et al. (2019). Leur projet consistait à concevoir et développer un outil pour évaluer la conscience de la situation de danger dans une technologie de conduite. Leur problématique était de savoir comment améliorer la sécurité du conducteur grâce à des écrans embarqués avancés pour fournir des avertissements sur les dangers de la route. Pour cela, ils ont créé un simulateur de conduite dont l'environnement virtuel était constitué de Head-Up Displays²⁰ permettant d'afficher les avertissements de danger. Les situations de conduite ont été définies conformément aux informations recueillies des rapports d'accident. Le véhicule virtuel était conduit en utilisant des pédales physiques et les commandes au volant. Les évaluations étaient faites surtout pour tirer des leçons au cours du processus de développement afin de proposer des recommandations méthodologiques pour aborder des problèmes rencontrés dans le développement de l'environnement virtuel. Les auteurs ont fait évaluer la version finale de leur simulateur par 30 participants. Les résultats soulignent que la moyenne des scores obtenus pour l'immersion et le réalisme était supérieure à 3 sur une échelle de 1 à 5. Ils précisent aussi

²⁰ **Head-Up Display** : « any transparent display that presents data without requiring users to look away from their usual viewpoints » (Pauzie, 2015).

que les participants ont rapidement réagi aux dangers en montrant les émotions attendues et les réactions d'anxiété et de peur. Ils ne donnent pas plus de détails sur les scores obtenus pour le sentiment de présence, mais affirment que l'outil a été capable de délivrer une présence effective.

10.3.2 CONFRONTATION DE L'ÉTUDE PRÉCÉDENTE À LA NÔTRE

En confrontant nos résultats à ceux présentés dans la section précédente, nous pouvons dire que notre dispositif répond bien aux exigences d'utilisabilité d'une application de réalité virtuelle en termes d'immersion, de présence et d'interactions (avec $\bar{x} > 7$ pour tous les points évalués). Cela se perçoit notamment au niveau de l'engagement naturel des participants dans la simulation ($\bar{x} = 8,45$; $\sigma = 1,42$), du niveau de contrôle qu'ils ont eu sur les événements ($\bar{x} = 8,62$; $\sigma = 1,21$), du réalisme et de naturalisme perçu pendant l'exploration visuelle et le déplacement dans l'EV ($\bar{x} = 9,06$; $\sigma = 0,58$), de la rétroaction de l'environnement ($\bar{x} = 9,20$; $\sigma = 0,76$), des écarts cohérents dans les mécaniques d'interaction ($\bar{x} = 8,87$; $\sigma = 0,96$), du sentiment de présence général ($\bar{x} = 8,70$; $\sigma = 0,62$) et de l'expérience globale vécue par les participants ($\bar{x} = 9,12$; $\sigma = 0,92$). Nous pouvons observer sur la Figure 18 que le score minimal obtenu pour une heuristique donnée est de 7,3, avec 75% de scores supérieur à 7,3. Cela pourrait témoigner d'un bon degré d'unanimité des participants dans l'évaluation. Néanmoins, pour la première heuristique (Engagement naturel), on peut souligner les scores x_2 et x_4 des participants P₂ et P₄ qui sont situés à pratiquement deux écarts-types de la moyenne. Nous pouvons expliquer cela par le fait qu'il y ait eu des éléments de distraction durant l'expérimentation. Pour le participant P₂, cela est dû au fait qu'il a rapporté avoir été parfaitement conscient du temps qui passait durant son expérimentation. Le participant P₄ quant à lui était particulièrement exigeant au niveau des réglages d'aisance du véhicule

(siège conducteur, rétroviseur ...). Il souhaitait que sa position assise face à son volant virtuel et la position de ses rétroviseurs virtuels soient ajustées à la perfection. Pour le satisfaire et lui permettre de passer son expérimentation, nous avons mis la simulation en pause et nous avons effectué des réglages au niveau des caméras dans l'éditeur Unity 3D. Il a tout de même rapporté avoir été embarrassé de ne pas être capable de faire ces réglages lui-même, directement dans l'outil, comme il le ferait dans la vraie vie. Nous avons pris en note ce point, ainsi que les autres suggestions faites par les participants. Il serait peut-être pertinent d'avoir plus de participants, et de discuter avec le clinicien pour pouvoir juger de la pertinence de chacune des suggestions afin d'améliorerons du simulateur pour les applications cliniques. Néanmoins, Il est important de souligner ici que le but n'est pas de parvenir à une copie du réel, mais plutôt à un outil capable de susciter la mémoire du patient pour qu'il puisse parvenir à un contrôle.

10.3.3 LIMITES

La première limite que nous pouvons souligner est que l'échantillon est très réduit et ne permet pas forcément d'avoir une évaluation rigoureuse. On doit aussi noter que le profil des participants à cette évaluation n'était pas assez représentatif du public visé par cet outil tant au niveau de l'emploi qu'ils occupent (tous les participants étaient des étudiants) que de la tranche d'âge (trois participants dans la vingtaine, trois autres dans la trentaine et deux dans la quarantaine). En effet, la moyenne d'âge des camionneurs au Canada est de 46 ans (Bouchard, 2013). De plus on ne saurait attester de l'habileté des utilisateurs finaux avec les technologies. Néanmoins, ce qu'il est intéressant de souligner c'est que sept participants sur huit ne connaissaient pas les dispositifs d'affichage et de contrôle, mais ont rapporté des scores maximaux sur l'intuitivité ($\bar{x} = 9,62$; $\sigma = 0,48$ pour les interfaces et $\bar{x} = 9,25$; $\sigma = 0,96$ pour les interactions), la facilité de prise en main de

l'outil ($\bar{x} = 9,12$; $\sigma = 0,92$) et la qualité de la rétroaction dans les interactions ($\bar{x} = 9,20$; $\sigma = 0,76$). Nous pouvons donc espérer que l'aspect technologique ne constitue pas une grande barrière pour les patients lors des applications cliniques.

10.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'évaluation que nous avons effectuée et les résultats obtenus. Ces résultats sont satisfaisants quant aux caractéristiques clés de la RV (l'interaction, l'immersion et la présence). Dans l'ensemble, nous avons observé que les participants étaient très à l'aise dans la conduite du véhicule virtuel. Ils ont présenté de bons réflexes face aux difficultés (exemple : conduite prudente pendant la nuit, sous la neige en hiver). Néanmoins, deux participants ont eu des cyber-malaises. Le malaise de l'un était la difficulté à respirer suivie de la transpiration. Le participant a souligné s'être senti étouffé du fait d'avoir à la fois un masque de protection contre la Covid-19 et le casque de RV sur son visage. L'autre participant a ressenti des nausées au bout d'une trentaine de minutes d'expérimentation. Cela est un qu'il serait pertinent d'explorer dans le futur.

CHAPITRE 11

PERSPECTIVES À COURT TERME

Résumé : Dans ce chapitre, nous présentons nos perspectives de recherche. Elles concernent particulièrement la mise en application effective des approches proposées dans le cadre de cette recherche. Pour ce faire, nous continuerons à travailler avec le centre de thérapie la futaie avec qui nous avons collaboré tout au long de cette thèse.

11.1 INTRODUCTION

Dans le cadre des traitements effectifs des utilisateurs finaux, les expérimentations seront menées en collaboration avec *La Futaie*. *La Futaie* est un centre de thérapie de la région du Saguenay. Elle offre des services de psychothérapie en résidence à une clientèle présentant de façon prépondérante des troubles d'usage de substances, souvent concomitants à des troubles psychoaffectifs issus de traumatismes. Le traitement sera supervisé par le spécialiste, le docteur Girard avec qui nous avons collaboré tout au long de cette recherche. Cette phase sera l'occasion d'éprouver nos propositions de recherche sur deux points principaux : 1) l'impact de l'action sur la thérapie conformément à l'approche ACET, et 2) la construction dynamique de meilleures appréhensions du monde grâce l'approche éactive implémentée à l'aide du système d'ajustement dynamique de la difficulté.

11.2 RECRUTEMENT

Nous avons en prévision de faire passer quatre camionneurs souffrant de Trouble de Stress Post-Traumatique (TSPT) sur une période de dix semaines. Les patients retenus

pour cette phase seront tous des camionneurs souffrant de TSPT et étant en résidence au centre de thérapie « La Futaie ». Chaque patient devra remplir un formulaire de consentement avant le début du programme. Vous trouverez ce formulaire en **Annexe 6**.

11.3 PRINCIPE D'ÉVALUATION

Sachant qu'il est souvent difficile de recruter plusieurs sujets pour mener de telles études, nous souhaitons exploiter l'approche expérimentale qui n'implique qu'un seul sujet. Au contraire des méthodes visant à étudier la variabilité entre les individus, ici nous nous focaliserons sur l'impact de l'usage de la technologie sur une seule et même personne qui servira aussi de sujet de contrôle.

11.3.1 LIEU D'ÉVALUATION ET PERSONNES PRÉSENTES.

Comme pour la phase précédente, les tests de cette phase se feront également dans notre laboratoire de l'UQAC. Les personnes présentes à une session de test seront : le spécialiste (le docteur Girard), le participant (un camionneur souffrant de TSPT), moi-même (la spécialiste technologique) et éventuellement mon directeur de recherche (le professeur Ménélas).

11.3.2 HYPOTHÈSES

Pour ces expérimentations, les hypothèses sont les suivantes :

Hypothèse 1 : Les interactions du sujet avec l'EV favoriseront la diminution des symptômes de stress post-traumatique au cours du traitement, au point d'atteindre le non-diagnostic, et ce non-diagnostic sera maintenu après 6 mois et 1 an post-traitement.

Hypothèse 2 : À l'aide du système d'ajustement dynamique du niveau d'anxiété, la réponse physiologique au stress encourue par l'exposition à l'environnement virtuel diminuera (diminution du rythme cardiaque et augmentation de la variabilité cardiaque) au cours des séances et cette diminution sera maintenue après 6 mois et 1 an post-traitement.

11.3.3 DEVIS DE RECHERCHE

Nous voulons faire une évaluation n'impliquant qu'un seul sujet, grâce à un devis quasi expérimental à cas unique impliquant une phase d'intervention, de type A-B-A (Barlow, 1976). Plusieurs mesures pré intervention permettent de comparer les participants à eux-mêmes, ce qui permet en partie de surmonter de façon scientifiquement probante les limites associées à l'absence de groupe de comparaison. Ainsi le participant devient son contrôle. Pour chaque segment des mesures, une recension systématique des modalités de recherche expérimentale à cas unique indique que de 3 à 5 mesures sont requises à chaque moment de la séquence de recherche (Smith, 2012). Afin de mener à bien cette étude, 5 mesures pré intervention (1A; 2A; 3A; 4A ; 5A), 10 mesures durant l'intervention (6B; 7B; 8B; 9B ; 10B ; 11B ; 12B ; 13B ; 14B ; 15B), et 7 mesures post-intervention (16A'; 17A'; 18A'; 19A') incluant 2 mesures de suivi après 6 mois (20A') et 1 an (21A') sont prévus. Le devis comporte donc 21 mesures quantitatives des symptômes de stress post-traumatique en tout. Une dimension qualitative est également intégrée au projet sous forme d'entretien initial portant sur les attentes et objectifs individuels liés à l'intervention, ainsi qu'un entretien final portant sur l'appréciation du programme et l'impression individuelle sur le succès de l'intervention, les éléments appréciés ou non appréciés dans l'expérience subjective du participant. Une question ouverte sur les événements de vie susceptibles d'avoir un impact sur l'état psychologique

en cours de traitement est également incluse à chaque temps de mesure, en plus du questionnaire sur les symptômes de stress post-traumatique. L'intervention de la phase B est constituée du programme de 10 séances hebdomadaires d'une durée d'une heure, développé suivant nos approches de traitement proposées dans cette thèse.

11.3.4 INSTRUMENTS DE MESURES AUTO-RAPPORTÉES

- **La version francophone du Posttraumatic Stress Disorder Checklist for DSM-5 (PCL-5) (Ashbaugh, Houle-Johnson, Herbert, El-Hage, & Brunet, 2016; Blevins, Weathers, Davis, Witte, & Domino, 2015).** Cet outil permet l'évaluation des symptômes de stress post-traumatique en vue d'un diagnostic et en vue d'évaluer l'évolution des symptômes en cours de traitement. Il est composé de 20 items de type Likert basés sur les symptômes du DSM-V, divisés en 4 échelles évaluant les symptômes de pensées intrusives (5 items), l'évitement (5 items), l'altération des fonctions cognitives et de l'humeur (5 items) et l'activation (5 items). La validation de la version originale et de la version francophone indique d'excellentes propriétés métriques avec un alpha de Cronbach de 0,94 pour le score total et des alphas supérieurs à 0,79 pour les sous-échelles. Vous trouverez ce questionnaire en Annexe 7.
- **Une feuille de profil** permettant de recueillir les informations comme le sexe du participant, sa tranche d'âge, l'existence ou non des situations de conduite particulièrement stressantes pour lui, l'expérience ou non avec l'utilisation des dispositifs de RV généraux, l'expérience ou non avec les différents dispositifs de RV utilisés pour notre simulateur (Casque Oculus Rift, Logitech G27), la dépendance ou non à des substances et la présence d'autres troubles mentaux. Vous trouverez cette feuille de profil en Annexe 8.

- **Un questionnaire qualitatif maison** permettant recueillir les objectifs et attentes avant l'intervention ainsi que l'appréciation et l'impression de succès thérapeutique à la fin de l'intervention. Vous trouverez ce questionnaire en Annexe 9.
- **Un item élaboré par l'équipe sur les évènements de vie** qui sont susceptibles d'influencer l'état psychologique du participant sera ajouté à chaque temps de mesure. Vous trouverez ce questionnaire en **Annexe 10**.
- **Un questionnaire anthropométrique** incluant le sexe, l'âge, le niveau socioéconomique, la taille, le poids et la médication (pourrait influencer le rythme cardiaque) sera administré au début de l'étude. Vous trouverez ce questionnaire en **Annexe 11**.
- **Un instrument de mesure de la réponse physiologique** : l'Hexoskin (voir section 8.3.3).

11.4 FRÉQUENCE DE PASSATION DES MESURES

Le questionnaire PCL-5, l'item sur les évènements de vie et l'Hexoskin seront utilisés à chacun des 21 temps de mesure. Les questionnaires qualitatifs seront utilisés une fois avant et une fois après l'intervention (phase B) et le questionnaire anthropométrique sera utilisé une seule fois au début de l'étude. Pour cela, nous voulons avoir un environnement virtuel capable de simuler les multiples facettes liées à la conduite automobile, tout en prenant en compte les réactions physiologiques du conducteur. Ainsi, pour tout scénario qui sera simulé nous verrons les réactions émotionnelles du sujet. Ainsi nous espérons parvenir à établir un lien de cause à effet entre les stimuli et les réactions physiologiques et émotionnelles de la personne.

11.5 STRATÉGIES D'ANALYSES

L'évolution des données quantitatives à chaque phase d'intervention sera analysée en tout premier lieu par une analyse visuelle systématique prenant en compte l'élévation des scores, la présence ou non d'une tendance dans les scores ainsi qu'une éventuelle stabilisation des scores avec le temps (Barlow, 1976). Ensuite la méthode de non-chevauchement du pourcentage excédant la médiane (Ma, 2009; Parker, Vannest, & Davis, 2011) sera utilisée afin de tester si des variations observables dans les scores dévient de la médiane du score de la phase pré intervention (A) à chacune des autres phases d'intervention. Les données qualitatives seront codifiées grâce au logiciel NVivo avec la méthode des thématiques principales et des valences évaluatives décrites par Saldaña et Omasta (Saldaña & Omasta, 2016).

11.6 RÉSULTATS ATTENDUS

Nous nous attendons à une diminution des symptômes des TSPT à la fin du traitement et à un maintien 6 mois et 1 an après le traitement. Pour vérifier la plus-value de nos approches de traitement, nous comparerons ces données à celles obtenues dans des études similaires utilisant les technologies de la RV pour le traitement du TSPT.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans cette thèse, nous avons présenté les différents travaux effectués dans le cadre du doctorat en sciences et technologies de l'information à l'Université du Québec à Chicoutimi. Ces travaux ont porté sur l'application des technologies de la Réalité Virtuelle (RV) à la thérapie par exposition pour le traitement du Trouble de Stress Post-Traumatique (TSPT).

Les technologies de la RV offrent une toute autre façon d'appréhender le virtuel. Elles placent l'utilisateur au centre du système et ainsi, celui-ci est considéré comme une entité vivante du monde virtuel et contribue activement au déroulement des événements de ce monde. Dans une boucle d'interaction de type *perception-décision-action-feedback*, l'utilisateur agit sur le monde et reçoit en retour la stimulation sensorielle du monde. Cette boucle d'interaction constitue l'essence de la RV. Cependant, l'analyse des travaux exploitant la RV pour le traitement du TSPT nous a permis de souligner l'absence de cette boucle d'interaction et le besoin d'agir que le patient pourrait avoir lors de la Thérapie d'Exposition par la Réalité Virtuelle (TERV). Dans ces études, le patient demeure passif dans une posture d'observateur lors de l'exposition, car l'exploitation de la RV dans y est limitée à l'amélioration de l'imagination. En effet, ces études se sont focalisées sur la composante modélisation 3D de la RV et sur la stimulation sensorielle. Alors, dans cette thèse, nous avons proposé des approches qui permettraient une meilleure exploitation des technologies de la RV lors de la TERV. Ces approches ont pour fondement l'apprentissage qui est le principal mécanisme par lequel l'exposition opère.

Notre première proposition a été l'approche ACET, une approche de traitement centré sur l'action du sujet dans son environnement (voir CHAPITRE 6). Après analyse des théories de l'apprentissage, nous en sommes arrivés à la conclusion qu'un meilleur apprentissage doit être centré sur l'action et l'activité du sujet dans son environnement. Au vu des possibilités d'actions que nous offrent les technologies de la RV, nous avons envisagé la TERV comme un processus d'apprentissage au cours duquel le patient utilise ses habiletés cognitives et motrices pour construire de nouvelles connaissances. Dans cette optique l'approche ACET consiste à aborder la TERV comme un SG en RV dans lequel le sujet utilise des mécaniques de jeu greffées à des mécaniques d'apprentissage pour évoluer vers le traitement.

En deuxième proposition, nous avons étendu la vision de l'ACET au paradigme de l'énaction car il est tout aussi important de considérer l'environnement d'exposition et les situations de thérapie au même titre que l'on considère le sujet (voir CHAPITRE 7). En revenant à l'apprentissage qui est à la base de notre argumentaire, le paradigme de l'énaction souligne une évolution conjointe et dynamique du sujet et de l'environnement lors du processus. Le point focal de cette approche qui la rend tout à fait intéressante pour la TERV est la mise en application concrète de la boucle d'interaction qui change à la fois le sujet et l'environnement virtuel. De la même manière que le sujet s'adapte à la stimulation sensorielle qu'il reçoit de son environnement, l'environnement s'adapte en retour à l'état émotionnel du sujet et aux actions qu'il effectue. Cette coadaptation permet au sujet d'évoluer vers des pensées plus saines vis-à-vis de l'environnement et des stimuli qu'il contient.

L'ensemble des deux premières propositions nous a orientés vers une standardisation de l'implémentation des outils de TERV. Nous avons donc proposé dans le CHAPITRE 8, le rapport de conception d'un simulateur de conduite de camion en RV basé sur ces approches. Afin de considérer l'ensemble des éléments clés de la RV, nous avons construit ce simulateur à partir de la méthode de conception et d'évaluation des environnements de RV (Fuchs, Moreau, Burkhardt, et al., 2006).

Nos approches consistant à envisager la thérapie comme un SG, elles ont cette particularité de viser l'acquisition de nouvelles connaissances, compétences ou comportements à travers des actions et des interactions du patient avec le système. Ainsi, un des points essentiels à considérer est que les activités proposées dans le système puissent suivre la courbe d'apprentissage du joueur et s'adapter dynamiquement à ses compétences. Pour cela, nous avons présenté au CHAPITRE 9 le développement d'un module d'ajustement dynamique de la difficulté en fonction de l'état émotionnel courant du patient. Dans ce module, l'ajustement peut fonctionner suivant trois modes : un mode *offline* dans lequel les paramètres de la scène virtuelle sont présélectionnés par le thérapeute avant le lancement de l'outil, un mode manuel *online* dans lequel le thérapeute a la possibilité de modifier les paramètres de l'EV pendant que le sujet est exposé, et un mode automatique *online* dans lequel un algorithme d'ajustement dynamique de la difficulté est exécuté.

La première étape d'évaluation de ces approches a consisté à évaluer, avec les personnes saines, la qualité globale du simulateur en termes d'immersion, de présence et d'interactions (voir CHAPITRE 10). Le sentiment de présence a été atteint à travers cet outil et les participants ont trouvé la qualité des interactions avec l'EV optimale.

Les perspectives à court terme vont consister à se baser sur ces approches pour effectuer des applications cliniques avec des camionneurs souffrant de TSPT. Dans le CHAPITRE 11, nous avons décrit la planification complète de ces traitements qui seront conduits en collaboration avec un spécialiste du domaine des troubles mentaux. Nous les effectuerons avec les patients en résidence au centre de thérapie la Futaie, qui nous a accompagnés tout au long de cette recherche.

À long terme, nous envisageons d'appliquer les approches présentées dans cette recherche aux autres troubles mentaux dont le traitement s'effectue par thérapie d'exposition. Cela nous permettra de vérifier la généralisation de ces approches.

Dans ce travail, nous avons souligné que le but visé par les jeux sérieux est de faire passer un apprentissage à travers du contenu ludique. De ce fait, l'approche ACET présentée ici pourrait très bien s'appliquer à d'autres types de jeux sérieux, car l'idée maitresse est de mettre en avant des actions spécifiques pour optimiser l'acquisition des habiletés. Nous avons par exemple exploré cela dans le cadre d'un jeu sérieux destiné à la formation des travailleurs du secteur du bâtiment sur les risques et conséquences de l'inhalation de la poussière de silice en milieu de travail (Kamkuimo K., Girard, Lapointe, & Menelas, 2020).

Enfin, il faut noter que l'ADD dans les jeux vidéos s'est beaucoup plus focalisé sur l'adaptation du jeu aux performances du joueur dans le jeu. Le volet d'ajustement selon des paramètres plus objectifs n'est pas encore très exploré. Le CHAPITRE 9 a présenté un modèle d'ADD basé sur le *feedback* physiologique de l'utilisateur. Ce volet spécifique pourrait amplement s'appliquer autant aux autres types de jeux sérieux qu'aux

jeux vidéos à vocation purement ludique. Ainsi, nous envisageons de l'explorer afin de voir s'il pourrait apporter un plus aux systèmes actuels d'ADD implémentés dans les jeux vidéos et ainsi améliorer l'expérience globale des joueurs lorsqu'ils jouent aux jeux.

ANNEXES

Annexe 1 : Approbation éthique



Le 27 septembre 2019

À l'attention de :

Sorelle Audrey Kamkuimo Kengne, Étudiante (Doctorat en sciences et technologies de l'information)
Département d'informatique et de mathématique, UQAC

Dr. Bob-Antoine-Jerry Ménélas, Professeur
Département d'informatique et de mathématique, UQAC

Projet : 2020-237

Titre du projet de recherche : Étude quasi-expérimentale à cas unique de l'impact d'un programme d'exposition systématique utilisant la réalité virtuelle sur les symptômes de stress post-traumatique et la réponse physiologique d'un patient camionneur victime d'un traumatisme sur la route.

Objet : Approbation éthique de votre projet de recherche

Bonjour,

Votre projet de recherche a fait l'objet d'une évaluation en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Chicoutimi (CER-UQAC).

Un certificat d'approbation éthique qui atteste de la conformité de votre projet de recherche à la [Politique d'éthique de la recherche avec des êtres humains](#), de l'UQAC est émis en date du 13 septembre 2019. Prenez note que ce certificat est **valide jusqu'au 27 septembre 2020**.

Veillez noter que le Formulaire d'information et de consentement (FIC) a été officialisée. Ce document a été déposé dans votre projet (voir les documents précédés d'un carré mauve dans la section «Fichiers» - «Documents officiels»). Cette version est celle autorisée par le CER et devra être utilisée pour votre projet.

Notez qu'en vertu de la [Politique d'éthique de la recherche avec des êtres humains](#), il est de la responsabilité des chercheurs d'assurer que leurs projets de recherche conservent une approbation éthique pour toute la durée des travaux de recherche et d'informer le CER de la fin de ceux-ci. Vous devrez donc obtenir le renouvellement de votre approbation éthique avant l'expiration de ce certificat à l'aide du formulaire *F7 - Renouvellement annuel*. Un rappel automatique vous sera envoyé par courriel quelques semaines avant l'échéance de votre certificat. Un rapport non remis entraînera la fermeture du dossier éthique dans les 30 jours qui suivent et une mention y sera ajoutée. Ainsi, la poursuite de la **cueillette de données** auprès des participants, sans certification éthique valide, ou le fait d'**apporter une modification significative** (à la population ciblée, au formulaire de consentement, au protocole d'expérimentation, à la méthode de collecte ou de traitement des données, etc.) **ou affectant le niveau de risque du projet** sans approbation du CER-UQAC représentent des situations relevant de la [Politique relative à la conduite responsable en recherche et en création](#). De plus, le chercheur a l'obligation de signaler tout incident grave dès qu'il survient. Si des modifications sont apportées à votre projet avant l'échéance du certificat, vous devrez remplir le formulaire *F8 - Modification de projet* et obtenir l'approbation du CER avant de mettre en oeuvre ces modifications. Si votre projet est terminé avant l'échéance du certificat, vous devrez remplir le

UQAC

Université du Québec
à Chicoutimi

formulaire *F9 - Fin de projet* .

Veillez prendre note que le Décanat des études est mis en copie conforme de ce courriel afin de l'aviser de l'obtention de votre certification éthique.

Enfin, puisque votre demande d'approbation indique l'obtention d'un financement au nom de votre direction de recherche, monsieur Ménélas, le Décanat de la recherche et de la création est mis en copie conforme afin de l'informer de l'obtention de la certification éthique.

En vous souhaitant bon succès dans la réalisation de votre recherche, veuillez recevoir nos salutations distinguées.

Le CER-UQAC

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

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

Par ailleurs, les membres jugent que ce projet rencontre les critères d'une recherche à risque minimal.

Projet # : 2020-237

Titre du projet de recherche : Étude quasi-expérimentale à cas unique de l'impact d'un programme d'exposition systématique utilisant la réalité virtuelle sur les symptômes de stress post-traumatique et la réponse physiologique d'un patient camionneur victime d'un traumatisme sur la route.

Chercheur principal :

Sorelle Audrey Kamkuimo Kengne, Étudiante (Doctorat en sciences et technologies de l'information)
Département d'informatique et de mathématique, UQAC

Directeur/codirecteur :

Dr. Bob-Antoine-Jerry Ménélas, Professeur
Département d'informatique et de mathématique, UQAC

Cochercheur(s) :

UQAC: Linda Paquette
Externe: Benoît Girard

Financement : Subvention régulière de la Fondation de l'UQAC (2018-2019)

Date d'approbation du projet : 13 septembre 2019

Date d'entrée en vigueur du certificat : 13 septembre 2019

Date d'échéance du certificat : 27 septembre 2020



Stéphane Allaire

Annexe 2 : Feuille de profil pour le test d'utilisabilité

Évaluation d'utilisabilité à la recherche sur l'utilisation d'un simulateur de conduite de camion en réalité virtuelle pour le traitement de camionneurs souffrant de Trouble de Stress Post-Traumatique à la suite d'un accident de la route.

Code du participant : _____

Feuille de Profil

Sexe : Masculin Féminin Autre

Tranche d'âge : 15-20 ans 20-30 ans 30-40 ans 40-50 ans 50 ans et plus

Avez-vous un permis de conduire ? Oui Non

Avez-vous une expérience en conduite de poids lourd ? Oui Non

Avez-vous un ou plusieurs troubles mentaux connus ? Oui Non

Si oui, nommez-les SVP : _____

Avez-vous déjà utilisé un ou plusieurs dispositifs de réalité virtuelle ? Oui Non

Si oui, lesquels ? _____

Annexe 3 : Questionnaire de présence simplifié

Questionnaire de présence simplifié

Tiré du Questionnaire de présence proposé par Witmer et Singer (1998)

S'il vous plaît, entourez le niveau qui correspond au mieux à votre expérience

1- À quel point avez-vous pu avoir le contrôle sur les événements?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

2- À quel point l'environnement était-il réactif aux actions que vous avez effectuées?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

3- À quel point tous vos sens étaient-ils complètement engagés?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

4- À quel point les aspects visuels de l'environnement virtuel vous ont fait vous sentir impliqués dans l'environnement?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

5- À quel point la qualité de l'affichage visuel était-elle agréable dans l'exécution des tâches assignées ou des activités requises?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

6- À quel point étiez-vous conscient des événements qui se produisaient dans le monde réel autour de vous?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

7- À quel point l'exploration visuelle vous a-telle parue réaliste?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

8- À quel point votre déplacement dans l'environnement virtuel était-il naturel?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

9- À quel point avez-vous pu examiner des objets de près?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

10- À quel point les mécaniques de contrôle n'étaient-ils pas distrayants?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

11- À quel point pourriez-vous vous concentrer sur les tâches assignées ou les activités requises plutôt que sur les mécaniques utilisées pour exécuter ces tâches ou ces activités?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

12- Avez-vous été impliqué dans la tâche expérimentale au point de perdre la notion du temps?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

Annexe 4 : Questionnaire d'évaluation de la qualité de l'outil et des interactions

Évaluation de la qualité de l'outil et des interactions qui y sont proposées

1- Connaissez-vous les dispositifs d'affichage et de contrôle avant le test?

Oui Non Un peu

2- À quel point les dispositifs utilisés (casque, volant de course) étaient-ils intuitifs pour vos interactions avec l'environnement virtuel?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

3- À quel point les mécaniques d'interaction proposées par l'outil étaient faciles de prise en main? Exemple : utiliser le volant pour conduire, utiliser les boutons pour se déplacer

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

4- À quel point les interactions disponibles ont-ils permis d'améliorer votre réalisme perçu?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

5- À quel point l'outil était-il facile de prise en main?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

6- À quel point vos interactions avec l'environnement vous ont semblé intuitifs et naturels? se déplacer pour aller choisir le camion, entrer dans le camion, démarrer, allumer la radio, conduire le camion, se déplacer dans l'environnement d'apaisement ou neutre.

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

7- À quel point le feedback sonore a amélioré votre expérience? Le son des pas pendant la marche, le son qui accompagne l'entrée dans le camion, le son qui accompagne le démarrage du moteur, la radio, le son du vent en cas de tempête de neige en hiver.

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

8- À quel point la scène de tapis volant vous a-t-elle semblée féérique?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

9- À quel point l'environnement neutre vous a semblé apaisant?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

10- À quel point évaluez-vous votre expérience globale?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 *Totalement*

Annexe 6 : Formulaire de consentement

FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT CONCERNANT LA PARTICIPATION

1. TITRE DU PROJET

Exploitation des technologies de réalité virtuelle pour un traitement centré-action du trouble de stress post-traumatique.

2. RESPONSABLE(S) DU PROJET DE RECHERCHE

Étudiante responsable : Sorelle Audrey Kamkuimo
Étudiante au doctorat en informatique
Université du Québec à Chicoutimi P2-4220
(418) 376-9032

Directeur de recherche : Bob-Antoine J. Ménélas
Professeur au Département d'informatique et de mathématiques
Université du Québec à Chicoutimi P4-5270
(418) 545-5011 Poste 5060

3. PRÉAMBULE

Nous sollicitons votre participation à un projet de recherche. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet et de signer ce formulaire d'information et de consentement, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Ce formulaire peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles au chercheur responsable du projet ou aux autres membres du personnel affecté au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

4. NATURE, OBJECTIFS ET DÉROULEMENT DU PROJET DE RECHERCHE

4.1. Description du projet de recherche

L'exploitation des technologies de la Réalité Virtuelle (RV) dans les domaines de l'éducation, de la rééducation et des neurosciences est de plus en plus reconnue. En particulier, il a été montré que pour une majorité de cas, l'usage des technologies de la RV tend à dépasser les approches traditionnelles du fait de leur validité *écologique* (proche du naturel). Dans le cadre du traitement du trouble de stress post-traumatique (TSPT), l'utilisation de la RV est en cours d'étude. Cette recherche porte sur le développement d'un simulateur de conduite de poids lourds à but thérapeutique, et la validation de la pertinence de certains éléments dans celui-ci. La problématique de recherche prend corps dans la création de scénarios virtuels centrés sur l'action du sujet et adaptés au traitement, en partenariat de médecins spécialistes et une psychologue.

4.2. Objectif(s) spécifique(s)

Ce projet a deux objectifs principaux : 1) Par le passé, l'équipe du professeur Ménélas a développé un simulateur de conduite qui exploite les technologies de la réalité virtuelle pour la prise en charge de personnes souffrant de trouble de stress post-traumatique. Notre premier objectif est donc de compléter le développement en nous focalisant sur l'amélioration de la facilité d'utilisation du simulateur et en concentrant la conception sur l'action et l'interaction du patient avec son environnement 2) Le Deuxième objectif sera de tester l'impact de ce programme en collaboration avec la professeure Paquette du département des sciences de la santé de l'UQAC. Deux hypothèses découlent de l'objectif 2 :

Hypothèse 1 : Les interactions du sujet avec le monde virtuel favoriseront la diminution des symptômes de stress post-traumatiques diminueront au cours du traitement, au point d'atteindre le non-diagnostic, et ce non-diagnostic sera maintenu après 6 mois et 1 an post-traitement.

Hypothèse 2 : À l'aide du système d'ajustement dynamique, la réponse physiologique au stress encourue par l'exposition à l'EV diminuera (diminution du rythme cardiaque et augmentation de la variabilité cardiaque) au cours des séances et cette diminution sera maintenue après 6 mois et 1 an post-traitement.

Au-delà des connaissances théoriques liées à la multidisciplinarité de la réalité virtuelle, ce projet permettra d'améliorer les traitements. Le rayonnement de ce projet très novateur sera significatif car, les travaux actuels du domaine exploitent très peu le potentiel interactif des technologies de la RV. Pour cela, nous recherchons des personnes présentant les critères diagnostic de trouble de stress post-traumatique pour

venir participer à environ huit sessions de traitement d'une durée d'en moyenne 60 minutes chacune.

4.3. Déroulement

Un casque de réalité virtuelle sera posé sur le visage du participant et il manipulera également un volant de jeu. En exploitant ces dispositifs, il est à noter que la vie privée de la personne est respectée, car il n'est pas possible de réaliser une identification de celle-ci. Au même titre, aucune caméra ou microphone ne sera utilisé.

Le processus d'évaluation se déroulera comme suit :

- i. Le participant sera immergé confortablement dans un environnement virtuel simulant la conduite d'un camion à l'aide de dispositifs visuel et sonores (Oculus Rift), et d'un volant de jeu (Logitech G27).
- ii. Le participant sera invité à faire deux trajets identiques sur le simulateur de conduite de poids lourds.
- iii. Le participant sera ensuite invité à effectuer des scénarios de conduite prédéfinis puis en créer un avec l'outil intégré.
- iv. À la fin des séances, le participant sera invité à remplir des formulaires visant à évaluer son niveau d'immersion, d'engagement et de satisfaction. D'autres critères tels que l'utilisabilité et le mal du simulateur (nausées par exemple) seront aussi évalués par le participant.
- v. Enfin suivra un bref entretien, où deux questions seront posées.

5. AVANTAGES, RISQUES ET/OU INCONVÉNIENTS ASSOCIÉS AU PROJET DE RECHERCHE

Ces travaux permettront en tout premier lieu de donner des validations préliminaires de l'efficacité du simulateur de conduite de poids lourds pour le traitement des personnes souffrant de trouble de stress post-traumatique. Les éléments de scénarios personnalisables et centrés sur l'action du participant viendront apporter un élément novateur au projet. Par son aspect novateur notamment basé sur l'utilisation de la réalité virtuelle pour une thérapie centrée-action du patient, cette recherche devra aboutir à la publication d'un article scientifique. En aucun cas cette recherche ne présente de risques quelconques pour le participant.

6. CONFIDENTIALITÉ DES DONNÉES

- Dans le cadre de cette recherche, toutes les informations seront recueillies de manière complètement anonyme.
- Aucune donnée permettant d'identifier une personne ne sera sauvegardée.
- En aucun temps, quelqu'un d'autre aura accès aux informations recueillies pour cette recherche.
- La plus grande confidentialité est nécessaire en raison des démarches de protection de la propriété intellectuelle pouvant découler de cette recherche.
- Le participant s'engage à conserver confidentiel le processus d'évaluation des performances humaines ainsi que le matériel utilisé. Le participant s'engage à ne divulguer aucune information concernant l'expérience.
- Les chercheurs s'engagent à ne divulguer aucune information concernant le participant.

7. PARTICIPATION VOLONTAIRE ET DROIT DE RETRAIT

Votre participation à ce projet de recherche est volontaire. Vous êtes donc libre de refuser d'y participer. Vous pouvez également vous retirer de ce projet à n'importe quel moment, sans avoir à donner de raisons, en faisant connaître verbalement votre décision au chercheur responsable du projet. Si vous décidez de vous retirer du projet, les données vous concernant seront détruites.

8. INDEMNITÉ COMPENSATOIRE

Il n'y a aucune indemnité compensatoire.

9. CONSERVATION DES DOCUMENTS

En accord aux règlements de l'UQAC, les données relatives à cette étude seront sauvegardées sous clé pendant un maximum de 7 années. Il est à noter qu'aucune donnée permettant d'identifier participant ne sera sauvegardée. En effet, ce qui sera sauvegardé sera un code, sous forme d'un numéro alphanumérique par participant, ainsi que les performances réalisées (un temps en seconde, une distance en cm, le niveau d'immersion de la personne et son impression).

10. PERSONNES-RESSOURCES

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche ou si vous éprouvez un problème que vous croyez relié à votre participation au projet de recherche, vous pouvez communiquer avec les responsables du projet de recherche aux coordonnées suivantes :

Sorelle Audrey Kamkuimo Kengne

sorelle-audrey.kamkuimo-kengnel@uqac.ca;

(418) 376-9032

Bob-Antoine J Ménélas,

bamenela@uqac.ca

(418) 545-5011 poste 5060

Pour toute question d'ordre éthique concernant votre participation à ce projet de recherche, vous pouvez communiquer avec la coordonnatrice du Comité d'éthique de la recherche de l'UQAC aux coordonnées suivantes : 418-545-5011 poste 4704 ou cer@uqac.ca.

I. CONSETEMENTS

1. Consentement du participant

J'ai pris connaissance du formulaire d'information et de consentement. Je reconnais qu'on m'a expliqué le projet, qu'on a répondu à mes questions et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre une décision.

Je consens à participer à ce projet de recherche aux conditions qui y sont énoncées. Une copie signée et datée du présent formulaire d'information et de consentement m'a été remise.

Nom et signature du participant

.....

Date

2. Signature de la personne qui a obtenu le consentement si différent du chercheur responsable du projet de recherche.

J'ai expliqué au participant les termes du présent formulaire d'information et de consentement et j'ai répondu aux questions qu'il m'a posées.

Nom et signature de la personne qui obtient le consentement

.....

Date

3. Signature et engagement du chercheur responsable du projet

Je certifie qu'on a expliqué au sujet de recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement, que l'on a répondu aux questions que le sujet de recherche avait à cet égard et qu'on lui a clairement indiqué qu'il demeure libre de mettre un terme à sa participation, et ce, sans préjudice.

Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au formulaire d'information et de consentement et à en remettre une copie signée au sujet de recherche.

Nom et signature du chercheur responsable du projet de recherche

.....

Date

Annexe 7 : Traduction française du PCL-5

Source : (Ashbaugh et al., 2016)

PCL-5

Instructions: Ce questionnaire vous interroge sur des problèmes que vous auriez pu éprouver à la suite d'une expérience très stressante. Cela pourrait être tout événement qui implique des menaces de mort, des blessures graves ou de la violence sexuelle. L'évènement pourrait être quelque chose qui vous est arrivé directement, dont vous avez été témoin ou que vous avez appris qui est arrivé à un membre de votre famille proche ou à un ami proche. À titre d'exemple, il peut s'agir d'un accident grave, d'un incendie, d'un désastre naturel (ouragan, tornade ou tremblement de terre), d'un abus ou d'une agression physique ou sexuelle, d'une guerre, d'un homicide ou d'un suicide.

Pour commencer, SVP répondez à quelques questions concernant votre pire évènement, c'est-à-dire pour ce questionnaire, l'évènement qui vous dérange le plus actuellement. Ce pire évènement pourrait être un des exemples nommés ci-haut, ou une autre expérience très stressante. De plus, il pourrait s'agir d'un seul évènement (par exemple, un accident de voiture) ou de multiples évènements semblables (par exemple, de multiples évènements stressants dans une zone de guerre, ou des agressions sexuelles répétées).

Décrivez brièvement le pire évènement (si vous vous sentez suffisamment à l'aise pour le faire) : _____

Depuis combien de temps l'évènement s'est-il produit? _____ (donnez une estimation si vous n'êtes pas certain)

Cet évènement a-t-il entraîné la mort ou une menace de mort, une blessure grave, ou de la violence sexuelle?

___ Oui

___ Non

Comment l'avez-vous vécu? _____ Ça m'est arrivé directement

_____ J'en ai été témoin

_____ J'ai appris qu'un membre de la famille ou un ami proche l'a vécu

_____ J'y ai été exposé à plusieurs reprises dans le cadre de mon travail (par exemple, ambulancier, police, militaire, ou autre premier répondant)

_____ Autre, précisez :

Si l'évènement a entraîné la mort d'un membre de la famille ou d'un ami proche, était-ce dû à un type d'accident ou de violence, ou était-ce dû à des causes naturelles?

___ Un accident ou de la violence

___ Causes naturelles

___ Ne s'applique pas (l'évènement n'a pas entraîné la mort d'un membre de la famille ou d'un ami proche)

Ensuite, en gardant en tête le pire évènement vécu, lisez attentivement chacun des problèmes et encerclez un des chiffres à droite pour indiquer à quel point vous avez été dérangé par ce problème au cours du dernier mois.

Au cours du dernier mois, à quel point avez-vous été dérangé par :	Pas du tout	Un peu	Modérément	Beaucoup	Extrêmement
1. Des souvenirs répétitifs, perturbants et non désirés de l'expérience stressante?	0	1	2	3	4
2. Des rêves répétitifs et perturbants de l'expérience stressante?	0	1	2	3	4
3. L'impression soudaine de vous sentir ou d'agir comme si l'expérience stressante se produisait à nouveau (comme si vous étiez là en train de le revivre)?	0	1	2	3	4
4. Le fait d'être bouleversé lorsque quelque chose vous a rappelé l'expérience stressante?	0	1	2	3	4
5. De fortes réactions physiques quand quelque chose vous a rappelé l'expérience stressante (par exemple, palpitations cardiaques, difficultés à respirer, transpiration)?	0	1	2	3	4
6. L'évitement des souvenirs, pensées ou émotions associées à l'expérience stressante?	0	1	2	3	4
7. L'évitement des rappels externes de l'expérience stressante (par exemple, des personnes, des endroits, des conversations, des activités, des objets ou des situations)?	0	1	2	3	4
8. Le fait d'avoir de la difficulté à vous souvenir de certaines parties importantes de l'expérience stressante?	0	1	2	3	4
9. Le fait d'avoir de fortes croyances négatives de vous-même, d'autrui ou du monde (par exemple, avoir des pensées telles que «Je suis mauvais, il y a quelque chose qui ne va vraiment pas chez moi, on ne peut faire confiance à personne, le monde est tout à fait dangereux»)?	0	1	2	3	4
10. Le fait de vous blâmer ou de blâmer quelqu'un d'autre pour l'expérience stressante et/ou pour ce qui s'est produit par la suite?	0	1	2	3	4
11. La présence de fortes émotions négatives telles que la peur, l'horreur, la colère, la culpabilité ou la honte?	0	1	2	3	4
12. La perte d'intérêt pour les activités que vous aimiez auparavant?	0	1	2	3	4
13. Un sentiment d'éloignement ou d'isolement vis-à-vis des autres?	0	1	2	3	4
14. Le fait d'avoir de la difficulté à ressentir des émotions positives (par exemple, être incapable de ressentir de la joie ou de ressentir de l'amour pour vos proches)?	0	1	2	3	4
15. Le fait de vous sentir irritable ou en colère ou le fait d'agir de façon agressive?	0	1	2	3	4
16. Le fait de prendre trop de risques ou faire des choses qui pourraient vous blesser?	0	1	2	3	4
17. Le fait de vous sentir en état d'alerte, vigilant ou sur vos gardes?	0	1	2	3	4
18. Le fait de vous sentir agité ou de sursauter facilement?	0	1	2	3	4
19. Des difficultés de concentration?	0	1	2	3	4
20. Des difficultés à vous endormir ou à rester endormi?	0	1	2	3	4

Annexe 8 : Feuille de profil pour les utilisateurs finaux

Code du patient : _____ Date : _____

Feuille de Profil

Sexe : Masculin Féminin Autre

Tranche d'âge : 20-30 ans 30-40 ans 40-50 ans 50 ans et plus

Avez-vous un ou plusieurs troubles mentaux connus ? Oui Non

Si oui, nommez-les SVP : _____

Avez-vous des dépendances à une ou plusieurs substances ? Oui Non

Si oui, nommez ces substances SVP : _____

Y'a-t-il des situations de conduite qui vous stressent particulièrement ?

Oui Non

Si oui, lesquelles ? _____

Avez-vous déjà utilisé un ou plusieurs dispositifs de réalité virtuelle ? Oui Non

Si oui, lesquels ? _____

Annexe 9 : Questionnaire d'appréciation

Code du patient : _____ Date : _____

Questionnaire Qualitatif

Avant l'intervention

1. Quels sont vos objectifs et attentes vis-à-vis de cette intervention thérapeutique?

Après l'intervention

2.

- a) Quels éléments du programme avez-vous particulièrement aimés ?

- b) Quels éléments du programme avez-vous moins aimés ?

3.

- a) Comment ce programme a-t-il pu vous aider sur le plan des pensées ?

- b) Comment ce programme a-t-il pu vous aider sur le plan des émotions ?

- c) Comment ce programme a-t-il pu vous aider sur le plan des comportements ?

4. Auriez-tu des suggestions de modifications afin d'améliorer le programme ?

Annexe 10 : Questionnaire sur les évènements de vie

Code du patient: _____ Date : _____ Temps (Pré-Intervention)

Avez-vous eu des symptômes de trauma aujourd'hui ?

- a) Oui
- b) Non

Si oui, lesquels ?

Quelle heure était-il ? _____

Avez-vous vécu des évènements marquants durant la dernière semaine (heureux ou malheureux) ?

- a) Oui
- b) Non

Si oui, décrivez-les brièvement :

Annexe 11 : Questionnaire anthropométrique

Code du patient : _____ Date : _____

Questionnaire anthropométrique

Code du patient	Sexe (M/F)	Âge (années)	Date de naissance (jj/mm/aa)

Poids (kg)	
Taille (cm)	
Poitrine (cm)	
Taille (cm)	

Questions	Oui / Non	Si oui, nommez
Est-ce que vous avez un diagnostic de santé mentale ?		
Est-ce que vous prenez actuellement un traitement pharmacologique (médication) ?		

RÉFÉRENCES

- Abramowitz, J. S., Deacon, B. J., & Whiteside, S. P. (2019). *Exposure therapy for anxiety: Principles and practice*. New York, NY: Guilford Press.
- American Heart Association. (2015). All About Heart Rate (Pulse). Repéré le 10 avril 2021, à <https://www.heart.org/en/health-topics/high-blood-pressure/the-facts-about-high-blood-pressure/all-about-heart-rate-pulse>.
- Antle, A. N. (2009). LIFELONG INTERACTIONS Embodied child computer interaction: why embodiment matters. *interactions*, 16(2), 27-30.
- American Psychological Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM-5®)*. Washington, DC: American Psychiatric Association Pub.
- American Psychological Association. (2014). Present-centered therapy for post-traumatic stress disorder. Repéré le 10 avril 2021, à <https://div12.org/treatment/present-centered-therapy-for-post-traumatic-stress-disorder/>.
- American Psychological Association. (2017a). Clinical practice guideline for the treatment of PTSD. *Washington, DC: Author*, (American Psychiatric Association).
- American Psychological Association. (2017b). What is psychotherapy? Repéré le 11 juin 2019, à <https://www.psychiatry.org/patients-families/psychotherapy>.
- Arnab, S., Lim, T., Carvalho, M. B., Bellotti, F., De Freitas, S., Louchart, S., ... De Gloria, A. (2015). Mapping learning and game mechanics for serious games analysis. *British Journal of Educational Technology*, 46(2), 391-411.
- Ashbaugh, A. R., Houle-Johnson, S., Herbert, C., El-Hage, W., & Brunet, A. (2016). Psychometric validation of the English and French versions of the posttraumatic stress disorder checklist for DSM-5 (PCL-5). *PloS one*, 11(10), e0161645.
- Ballenger, J. C., Davidson, J. R., Lecrubier, Y., Nutt, D. J., Foa, E. B., Kessler, R. C., & McFarlane, A. C. (2000). Consensus statement on posttraumatic stress disorder from the International Consensus Group on Depression and Anxiety. *The Journal of Clinical Psychiatry*.
- Barlow, D. H., Nock, M. K., & Hersen, M. (1976). *Single case experimental designs: Strategies for studying behavior change*. Oxford, Royaume-Uni: Pergamon Press.
- Bastien, J. C., & Scapin, D. L. (1993). Ergonomic criteria for the evaluation of human-computer interfaces.
- Beck, J. G., Palyo, S. A., Winer, E. H., Schwagler, B. E., & Ang, E. J. (2007). Virtual reality exposure therapy for PTSD symptoms after a road accident: An uncontrolled case series. *Behavior therapy*, 38(1), 39-48.

- Bednar, A. K., Cunningham, D., Duffy, T. M., & Perry, J. D. (1992). Theory into practice: How do we link. *Constructivism and the technology of instruction: A conversation*, 8(1), 17-34.
- Biocca, F., & Levy, M. R. (2013). *Communication in the age of virtual reality*. Londres, Royaume-Uni: Routledge.
- Blanchard, E. B., & Hickling, E. J. (1997). *After the crash: Assessment and treatment of motor vehicle accident survivors*. American Psychological Association.
- Blanchard, E. B., Hickling, E. J., Buckley, T. C., Taylor, A. E., Vollmer, A., & Loos, W. R. (1996). Psychophysiology of posttraumatic stress disorder related to motor vehicle accidents: replication and extension. *Journal of consulting and clinical psychology*, 64(4), 742.
- Blevins, C. A., Weathers, F. W., Davis, M. T., Witte, T. K., & Domino, J. L. (2015). The posttraumatic stress disorder checklist for DSM-5 (PCL-5): Development and initial psychometric evaluation. *Journal of traumatic stress*, 28(6), 489-498.
- Botella, C., Baños, R., Perpiñá, C., Villa, H., Alcaniz, M., & Rey, A. (1998). Virtual reality treatment of claustrophobia: a case report. *Behaviour research and therapy*, 36(2), 239-246.
- Botella, C., Baños, R. M., Villa, H., Perpiñá, C., & García-Palacios, A. (2000). Virtual reality in the treatment of claustrophobic fear: A controlled, multiple-baseline design. *Behavior therapy*, 31(3), 583-595.
- Bouchard, S. (2013). La moyenne d'âge des conducteurs est supérieure à ce que l'on pensait. Repéré le 10 avril 2021, à <https://www.transportroutier.ca/nouvelles/30062/>.
- Bouchard, S., Côté, S., & Richard, D. C. (2007). Virtual reality applications for exposure. Dans *Handbook of exposure therapies* (pp. 347-388). Cambridge, MA: Elsevier.
- Bourgine, P., & Stewart, J. (2004). Autopoiesis and cognition. *Artificial life*, 10(3), 327-345.
- Bouton, M. E., & Bolles, R. C. (1979). Role of conditioned contextual stimuli in reinstatement of extinguished fear. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 5(4), 368.
- Brahimi, C., Farley, C., Joubert, P., Jobin, L., & Vézina, M. (2014). *The Competency-based Approach, a Lever for Changing Public Health Practices in Québec*. Québec, QC: Vice-présidence aux affaires scientifiques, Institut national de santé publique.
- Brewin, C. R., Dalgleish, T., & Joseph, S. (1996). A dual representation theory of posttraumatic stress disorder. *Psychological review*, 103(4), 670.

- Brown, J. S., Collins, A., & Duguid, P. (1989). Situated cognition and the culture of learning. *Educational researcher*, 18(1), 32-42.
- Bryant, R. A. (2016). *Acute stress disorder: What it is and how to treat it*. New York, NY: Guilford Publications.
- Burdea, G. C., & Coiffet, P. (2003). *Virtual reality technology*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Cárdenas-López, G., & De la Rosa-Gómez, A. (2011). Post-traumatic stress disorder treatment with virtual reality exposure for criminal violence: A case study in assault with violence. *International Journal on Disability and Human Development*, 10(4), 379-383.
- Cárdenas, G., & De La Rosa, A. (2012). Using virtual reality for PTSD treatment in criminal violence victims. *Journal of CyberTherapy & Rehabilitation*, 5(1), 65-67.
- Carlin, A. S., Hoffman, H. G., & Weghorst, S. (1997). Virtual reality and tactile augmentation in the treatment of spider phobia: a case report. *Behaviour research and therapy*, 35(2), 153-158.
- Castilla, D., Garcia-Palacios, A., Breton-Lopez, J., Miralles, I., Baños, R. M., Etchemendy, E., ... Botella, C. (2013). Process of design and usability evaluation of a telepsychology web and virtual reality system for the elderly: Butler. *International Journal of Human-Computer Studies*, 71(3), 350-362.
- Checa, D., & Bustillo, A. (2020). A review of immersive virtual reality serious games to enhance learning and training. *Multimedia Tools and Applications*, 79(9), 5501-5527.
- Chin, J. P., Diehl, V. A., & Norman, K. L. (1988). *Development of an instrument measuring user satisfaction of the human-computer interface*. Communication présentée au Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems.
- Clancey, W. J. (1986). *Review of Winograd and Flores' Understanding Computers and Cognition: A Favorable Interpretation*. : Stanford Univ CA Knowledge Systems Lab.
- Clark, D. A., & Beck, A. T. (2011). *Cognitive therapy of anxiety disorders: Science and practice*. New York, NY: Guilford Press.
- Colombetti, G. (2008). The somatic marker hypotheses, and what the Iowa Gambling Task does and does not show. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 59(1), 51-71.
- Costalli, F., Marucci, L., Mori, G., & Paterno, F. (2001). *Design Criteria for Usable Web-Accessible Virtual Environments*. Communication présentée au ICHIM (1)

- Craig, A. B., Sherman, W. R., & Will, J. D. (2009). *Developing virtual reality applications: Foundations of effective design*. Burlington, MA: Morgan Kaufmann.
- Craske, M. G., Kircanski, K., Zelikowsky, M., Mystkowski, J., Chowdhury, N., & Baker, A. (2008). Optimizing inhibitory learning during exposure therapy. *Behaviour research and therapy*, 46(1), 5-27.
- Craske, M. G., Treanor, M., Conway, C. C., Zbozinek, T., & Vervliet, B. (2014). Maximizing exposure therapy: An inhibitory learning approach. *Behaviour research and therapy*, 58, 10-23.
- Da Silva, M. P., Courboulay, V., Prigent, A., & Estraillier, P. (2008). *Real-time face tracking for attention aware adaptive games*. Communication présentée au International Conference on Computer Vision Systems.
- Davidson, J. (2004). Long-term treatment and prevention of posttraumatic stress disorder. *The Journal of clinical psychiatry*, 65, 44-48.
- Davis, S., Nesbitt, K., & Nalivaiko, E. (2014). *A systematic review of cybersickness*. Communication présentée au Proceedings of the 2014 conference on interactive entertainment.
- de la Rosa Gómez, A., & López, G. C. (2012). Posttraumatic stress disorder: Efficacy of a treatment program using virtual reality for victims of criminal violence in Mexican population. *Anuario de Psicología/The UB Journal of Psychology*, 42(3), 377-391.
- De Loor, P., Kristen, M. H., Windelschmidt, C., Devillers, F., Chevaillier, P., & Tisseau, J. (2014). Connecting Interactive Arts and Virtual Reality with Enaction.
- Delmas, G., Champagnat, R., & Augeraud, M. (2007). *Plot monitoring for interactive narrative games*. Communication présentée au Proceedings of the international conference on Advances in computer entertainment technology
- Desai, P. R., Desai, P. N., Ajmera, K. D., & Mehta, K. (2014). A review paper on oculus rift-a virtual reality headset. *arXiv preprint arXiv:1408.1173*.
- Dib, N., & Sturmey, P. (2012). Behavioral skills training and skill learning. *Encyclopedia of the Sciences of Learning*, 437-438.
- Difede, J., Cukor, J., Jayasinghe, N., Patt, I., Jedel, S., Spielman, L., ... Hoffman, H. G. (2007). Virtual reality exposure therapy for the treatment of posttraumatic stress disorder following September 11, 2001. *Journal of Clinical Psychiatry*, 68(11), 1639-1647.
- Difede, J., Cukor, J., Patt, I., Giosan, C., & Hoffman, H. (2006). The application of virtual reality to the treatment of PTSD following the WTC attack. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1071(1), 500-501.

- Difede, J., & Hoffman, H. G. (2002). Virtual reality exposure therapy for World Trade Center post-traumatic stress disorder: A case report. *Cyberpsychology & behavior*, 5(6), 529-535.
- DiPiro, J. T., Talbert, R. L., Yee, G. C., Matzke, G. R., Wells, B. G., & Posey, L. M. (2014). *Pharmacotherapy: a pathophysiologic approach* (Vol. 6). Pennsylvanie, PA: McGraw-Hill Education New York.
- Djaouti, D., Alvarez, J., & Jessel, J.-P. (2011). Classifying serious games: the G/P/S model. Dans *Handbook of research on improving learning and motivation through educational games: Multidisciplinary approaches* (pp. 118-136). Pennsylvanie, PA: IGI Global.
- Ecrepont, A., Haidon, C., Girard, B., & Menelas, B.-A. J. (2016). *A fully customizable truck-driving simulator for the care of people suffering from Post-Traumatic Stress Disorder*. Communication présentée au 2016 IEEE International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH).
- Ellis, S. R. (1994). What are virtual environments? *IEEE Computer Graphics and Applications*, 14(1), 17-22.
- EMDR-Canada. (2021). EMDR défini. Repéré le 10 avril 2021, à <https://emdrcanada.org/fr/emdr-definie/>.
- Emmelkamp, P. M., Krijn, M., Hulsbosch, A., De Vries, S., Schuemie, M. J., & van der Mast, C. A. (2002). Virtual reality treatment versus exposure in vivo: a comparative evaluation in acrophobia. *Behaviour research and therapy*, 40(5), 509-516.
- Ertmer, P. A., & Newby, T. J. (1993). Behaviorism, cognitivism, constructivism: Comparing critical features from an instructional design perspective. *Performance improvement quarterly*, 6(4), 50-72.
- Fabricatore, C. (2007). Gameplay and game mechanics: a key to quality in videogames. Repéré à <http://www.oecd.org/dataoecd/44/17/39414829.pdf>.
- Foa, E., Hembree, E., & Rothbaum, B. O. (2007). *Prolonged exposure therapy for PTSD: Emotional processing of traumatic experiences therapist guide*. Oxford, Royaume-Uni: Oxford University Press.
- Foa, E. B., & Kozak, M. J. (1986). Emotional processing of fear: exposure to corrective information. *Psychological bulletin*, 99(1), 20.
- Freedman, S. A., Hoffman, H. G., Garcia-Palacios, A., Weiss, P. L., Avitzour, S., & Josman, N. (2010). Prolonged exposure and virtual reality-enhanced imaginal exposure for PTSD following a terrorist bulldozer attack: a case study. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 13(1), 95-101.

- Freyth, C., Elsesser, K., Lohrmann, T., & Sartory, G. (2010). Effects of additional prolonged exposure to psychoeducation and relaxation in acute stress disorder. *Journal of anxiety disorders*, 24(8), 909-917.
- Friedman, M. J. (2007). PTSD history and overview. *United States Department of Veterans Affairs*. Repéré à https://www.ptsd.va.gov/professional/treat/essentials/history_ptsd.asp.
- Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A., & Vercher, J. L. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle: Vol. 1. L'homme et l'environnement virtuel* (3e éd.). Paris, France: Presses des Mines.
- Fuchs, P., Moreau, G., Burkhardt, J. M., & Coquillart, C. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle: Vol. 2. L'interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel* (3e éd.). Paris, France: Presses des Mines.
- Gabbard, J. L. (1997). *A taxonomy of usability characteristics in virtual environments*. Virginia Tech.
- Gahm, G., Reger, G., Ingram, M. V., Reger, M., & Rizzo, A. (2015). *A multisite, randomized clinical trial of virtual reality and prolonged exposure therapy for active duty soldiers with PTSD*. : Geneva foundation Tacoma WA.
- Gamito, P., Oliveira, J., Morais, D., Saraiva, T., Rosa, P., Leal, A., ... Pablo, C. (2007). War PTSD: A VR pre-trial case study. *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, 5, 191-198.
- Gamito, P., Oliveira, J., Rosa, P., Morais, D., Duarte, N., Oliveira, S., & Saraiva, T. (2010). PTSD elderly war veterans: A clinical controlled pilot study. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 13(1), 43-48.
- Garcia-Palacios, A., Hoffman, H., Carlin, A., Furness Iii, T., & Botella, C. (2002). Virtual reality in the treatment of spider phobia: a controlled study. *Behaviour research and therapy*, 40(9), 983-993.
- Gerardi, M., Rothbaum, B. O., Ressler, K., Heekin, M., & Rizzo, A. (2008). Virtual reality exposure therapy using a virtual Iraq: case report. *Journal of Traumatic Stress: Official Publication of The International Society for Traumatic Stress Studies*, 21(2), 209-213.
- Gigante, M. A. (1993). Virtual reality: definitions, history and applications. Dans *Virtual reality systems* (pp. 3-14). Cambridge, MA: Academic Press.
- Girard, B., Turcotte, V., Bouchard, S., & Girard, B. (2009). Crushing virtual cigarettes reduces tobacco addiction and treatment discontinuation. *CyberPsychology & Behavior*, 12(5), 477-483.
- Gonçalves, R., Pedrozo, A. L., Coutinho, E. S. F., Figueira, I., & Ventura, P. (2012). Efficacy of virtual reality exposure therapy in the treatment of PTSD: a systematic review. *PloS one*, 7(12), e48469.

- Haidon, C., Ecrepont, A., Girard, B., & Menelas, B.-A. J. (2017). A driving simulator designed for the care of trucker suffering from post-traumatic stress disorder. Dans *Serious Games and Edutainment Applications* (pp. 411-431). Cham, Suisse: Springer.
- Hodges, L. F., Rothbaum, B. O., Alarcon, R., Ready, D., Shahar, F., Graap, K., ... Wills, B. (1999). A virtual environment for the treatment of chronic combat-related post-traumatic stress disorder. *CyberPsychology & Behavior*, 2(1), 7-14.
- Hoffman, H. G., Garcia-Palacios, A., Carlin, A., Furness Iii, T. A., & Botella-Arbona, C. (2003). Interfaces that heal: coupling real and virtual objects to treat spider phobia. *international Journal of Human-Computer interaction*, 16(2), 283-300.
- Hunicke, R., & Chapman, V. (2004). AI for Dynamic Difficulty Adjustment in Games, Challenges in Game Arti_cial Intelligence AAAIWorkshop. *San Jose*, 91-96.
- Hvannberg, E. T., Halldórsdóttir, G., & Rudinsky, J. (2012). *Exploitation of heuristics for virtual environments*. Communication présentée au Proceedings of the 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Making Sense Through Design.
- Insko, B. E. (2003). Measuring presence: Subjective, behavioral and physiological methods. Dans *Being there: Concepts, effects and measurements of user presence in synthetic environments*. (pp. 109-119). Amsterdam, Pays-Bas: IOS Press.
- International Society for Presence Research. (2000). The concept of presence: Explication statement. Repéré le 05 août 2020, à <https://ispr.info/about-presence-2/about-presence/>.
- Jerald, J. (2015). *The VR book: Human-centered design for virtual reality*. San Rafael, CA: Morgan & Claypool.
- Johnson, A., & Crowe, D. A. (2009). Revisiting Tolman, his theories and cognitive maps. *Cogn Crit*, 1, 43-72.
- Johnson, C. (1998). On the problems of validating DesktopVR. Dans *People and Computers XIII* (pp. 327-338). Londres, Royaume-Uni: Springer.
- Josman, N., Reisberg, A., Weiss, P. L., Garcia-Palacios, A., & Hoffman, H. G. (2008). BusWorld: an analog pilot test of a virtual environment designed to treat posttraumatic stress disorder originating from a terrorist suicide bomb attack. *CyberPsychology & Behavior*, 11(6), 775-777.
- Kamkuimo K., S. A., Fossaert, M., Girard, B., & Menelas, B.-A. J. (2018). Action-Centered Exposure Therapy (ACET): A new approach to the use of virtual reality to the care of people with post-traumatic stress disorder. *Behavioral Sciences*, 8(8), 76.

- Kamkuimo K., S. A., Girard, B., Lapointe, P., & Menelas, B.-A. J. (2020). *Design and Implementation of a Serious Game to Make Construction Workers Aware of Exposure to Silica Dust in the Workplace*. Communication présentée au Joint International Conference on Serious Games.
- Kamkuimo K., S. A., Girard, B., & Menelas, B.-A. J. (2020). *Dynamic Difficulty Adjustment Through Real-Time Physiological Feedback for a More Adapted Virtual Reality Exposure Therapy*. Communication présentée au International Conference on Games and Learning Alliance.
- Kasurinen, J. (2017). Usability issues of virtual reality learning simulator in healthcare and cybersecurity. *Procedia computer science*, 119, 341-349.
- Kosslyn, S. M., Brunn, J., Cave, K. R., & Wallach, R. W. (1984). Individual differences in mental imagery ability: A computational analysis. *Cognition*, 18(1-3), 195-243.
- Kramer, T. L., Savary, P. E., Pyne, J. M., Kimbrell, T. A., & Jegley, S. M. (2013). Veteran perceptions of virtual reality to assess and treat posttraumatic stress disorder. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 16(4), 293-301.
- Lancaster, C. L., Teeters, J. B., Gros, D. F., & Back, S. E. (2016). Posttraumatic stress disorder: overview of evidence-based assessment and treatment. *Journal of clinical medicine*, 5(11), 105.
- Lang, P. J. (1977). Imagery in therapy: An information processing analysis of fear. *Behavior therapy*, 8(5), 862-886.
- Lanier, J. (1988). A vintage virtual reality interview.
- Lessiter, J., Freeman, J., Keogh, E., & Davidoff, J. (2001). A cross-media presence questionnaire: The ITC-Sense of Presence Inventory. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10(3), 282-297.
- Lim, K.-L., Jacobs, P., Ohinmaa, A., Schopflocher, D., & Dewa, C. S. (2008). A new population-based measure of the economic burden of mental illness in Canada. *Chronic diseases in Canada*, 28(3), 92-98.
- Little, D. (1991). Learning autonomy: definitions, issues and problems (Dublin, Authentik Language Learning Resources).
- Liu, C., Agrawal, P., Sarkar, N., & Chen, S. (2009). Dynamic difficulty adjustment in computer games through real-time anxiety-based affective feedback. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 25(6), 506-529.
- Ma, H.-H. (2009). The effectiveness of intervention on the behavior of individuals with autism: A meta-analysis using percentage of data points exceeding the median of baseline phase (PEM). *Behavior modification*, 33(3), 339-359.
- Malone, J. C. (1991). *Theories of learning: A historical approach*. Belmont, CA: Wadsworth Publishing Company.

- Masciotra, D., & Roth, W.-M. (2007a). Enactive Being in Situation to. Dans *Enaction* (pp. 7-33): Brill Sense.
- Masciotra, D., & Roth, W.-M. (2007b). On Networks and Spielraum. Dans *Enaction* (pp. 35-51): Brill Sense.
- Masciotra, D., & Roth, W.-M. (2007c). Relationality. Dans *Enaction* (pp. 53-77): Brill Sense.
- Masciotra, D., & Roth, W.-M. (2007d). Toward a Theory of Enaction. Dans *Enaction* (pp. 1-5): Brill Sense.
- Masciotra, D., Roth, W.-M., & Morel, D. (2007). *Enaction: Toward a Zen mind in learning and teaching*. Brill Sense.
- McLay, R. N., Baird, A., Webb-Murphy, J., Deal, W., Tran, L., Anson, H., ... Johnston, S. (2017). A randomized, head-to-head study of virtual reality exposure therapy for posttraumatic stress disorder. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 20(4), 218-224.
- McLay, R. N., Graap, K., Spira, J., Perlman, K., Johnston, S., Rothbaum, B. O., ... Baird, A. (2012). Development and testing of virtual reality exposure therapy for post-traumatic stress disorder in active duty service members who served in Iraq and Afghanistan. *Military medicine*, 177(6), 635-642.
- McLay, R. N., McBrien, C., Wiederhold, M. D., & Wiederhold, B. K. (2010). Exposure therapy with and without virtual reality to treat PTSD while in the combat theater: A parallel case series. *Cyberpsychology, behavior, and social networking*, 13(1), 37-42.
- McLay, R. N., Wood, D. P., Webb-Murphy, J. A., Spira, J. L., Wiederhold, M. D., Pyne, J. M., & Wiederhold, B. K. (2011). A randomized, controlled trial of virtual reality-graded exposure therapy for post-traumatic stress disorder in active duty service members with combat-related post-traumatic stress disorder. *Cyberpsychology, behavior, and social networking*, 14(4), 223-229.
- McLeod, S. (2007). Bf skinner: Operant conditioning. Retrieved September, 9(2009), 77.
- McMahan, R. P., Bowman, D. A., Zielinski, D. J., & Brady, R. B. (2012). Evaluating display fidelity and interaction fidelity in a virtual reality game. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 18(4), 626-633.
- Medicinenet. (2021a). Medical Definition of Blind. Repéré le 10 avril 2021, à https://www.medicinenet.com/randomized_controlled_trial/definition.htm.
- Medicinenet. (2021b). Medical Definition of Randomized controlled trial. Repéré le 10 avril 2021, à https://www.medicinenet.com/randomized_controlled_trial/definition.htm.

- Menelas, B. A. J., & Benaoudia, R. S. (2017). Use of Haptics to Promote Learning Outcomes in Serious Games. *Multimodal Technologies and Interaction*, 1(4), 31.
- Menelas, B. A. J., Haidon, C., Ecrepont, A., & Girard, B. (2016). *Use of virtual reality technologies as an Action-Cue Exposure Therapy for truck drivers suffering from Post-Traumatic Stress Disorder*. *Entertainment computing*, 24, 1-9.
- Menelas, B. A. J., Haidon, C., Ecrepont, A., & Girard, B. (2018). Use of virtual reality technologies as an Action-Cue Exposure Therapy for truck drivers suffering from Post-Traumatic Stress Disorder. *Entertainment computing*, 24, 1-9.
- Menelas, B. A. J., & Otis, M. (2012). *Design of a serious game for learning vibrotactile messages*. Communication présentée au 2012 IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games (HAVE 2012) Proceedings.
- Menelas, B. A. J., Picinali, L., Bourdot, P., & Katz, B. (2014). Non-visual identification, localization, and selection of entities of interest in a 3D environment. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 8(3), 243-256.
- Merriam-Webster. (1987). Virtual Reality. Dans *Merriam-Webster.com dictionary*. Repéré à <https://www.merriam-webster.com/dictionary/virtual%20reality>.
- Merriam-Webster. (n.d.). Theater of war. Dans *Merriam-Webster.com dictionary*. Repéré à <https://www.merriam-webster.com/dictionary/theater%20of%20war>.
- Michaud, M., Bouchard, S., Dumoulin, S., Zhong, X., & Renaud, P. (2004). *Manipulating presence and its impact on anxiety*. Communication présentée au *Cyberpsychology & behavior*.
- Miller, G. A. (2003). The cognitive revolution: a historical perspective. *Trends in cognitive sciences*, 7(3), 141-144.
- Mozgai, S., Hartholt, A., Leeds, A., & Rizzo, A. S. (2020). *Iterative Participatory Design for VRET Domain Transfer: From Combat Exposure to Military Sexual Trauma*. Communication présentée au Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems.
- Najavits, L. (2002). *Seeking safety: A treatment manual for PTSD and substance abuse*. New York, NY: Guilford Publications.
- Nichols, S., & Patel, H. (2002). Health and safety implications of virtual reality: a review of empirical evidence. *Applied ergonomics*, 33(3), 251-271.
- Nielsen, J. (1994). *Enhancing the explanatory power of usability heuristics*. Communication présentée au Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems.
- Ninaus, M., Tsarava, K., & Moeller, K. (2019). *A pilot study on the feasibility of dynamic difficulty adjustment in game-based learning using heart-rate*. Communication présentée au International Conference on Games and Learning Alliance

- Nugent, P. M. S. (2013). In vivo exposure therapy. Dans *Psychology Dictionary*. Repéré à <https://psychologydictionary.org/in-vivo-exposure-therapy/>.
- Office québécois de la langue française. (2000a). Essai clinique. Dans *Grand dictionnaire terminologique*. Repéré à http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8873403.
- Office québécois de la langue française. (2000b). Essai ouvert. Dans *Grand dictionnaire terminologique*. Repéré à http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8873403.
- Parés, N., & Parés, R. (2001). Interaction-driven virtual reality application design (a particular case: El ball del fanalet or lightpools). *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10(2), 236-245.
- Parker, R. I., Vannest, K. J., & Davis, J. L. (2011). Effect size in single-case research: A review of nine nonoverlap techniques. *Behavior Modification*, 35(4), 303-322.
- Pauzie, A. (2015). *Head Up Display in Automotive: A New Reality for the Driver*. Communication présentée au International Conference of Design, User Experience, and Usability., Cham.
- Pavlov, I. P. (1927). Conditioned reflexes, translated by GV Anrep. *London: Oxford*.
- Pinelle, D., Wong, N., & Stach, T. (2008). *Heuristic evaluation for games: usability principles for video game design*. Communication présentée au Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems.
- Powers, M. B., Smits, J. A., Leyro, T. M., & Otto, M. W. (2007). Translational research perspectives on maximizing the effectiveness of exposure therapy. Dans *Handbook of exposure therapies* (pp. 109-126). Cambridge, MA: Academic Press.
- Ready, D. J., Gerardi, R. J., Backscheider, A. G., Mascaró, N., & Rothbaum, B. O. (2010). Comparing virtual reality exposure therapy to present-centered therapy with 11 US Vietnam veterans with PTSD. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 13(1), 49-54.
- Ready, D. J., Pollack, S., Rothbaum, B. O., & Alarcon, R. D. (2006). Virtual reality exposure for veterans with posttraumatic stress disorder. *Journal of aggression, maltreatment & trauma*, 12(1-2), 199-220.
- Reger, G. M., & Gahm, G. A. (2008). Virtual reality exposure therapy for active duty soldiers. *Journal of Clinical Psychology*, 64(8), 940-946.
- Reger, G. M., Gahm, G. A., Rizzo, A. A., Swanson, R., & Duma, S. (2009). Soldier evaluation of the virtual reality Iraq. *Telemedicine and e-Health*, 15(1), 101-104.

- Reger, G. M., Holloway, K. M., Candy, C., Rothbaum, B. O., Difede, J., Rizzo, A. A., & Gahm, G. A. (2011). Effectiveness of virtual reality exposure therapy for active duty soldiers in a military mental health clinic. *Journal of traumatic stress, 24*(1), 93-96.
- Reger, G. M., Koenen-Woods, P., Zetocha, K., Smolenski, D. J., Holloway, K. M., Rothbaum, B. O., ... Skopp, N. A. (2016). Randomized controlled trial of prolonged exposure using imaginal exposure vs. virtual reality exposure in active duty soldiers with deployment-related posttraumatic stress disorder (PTSD). *Journal of consulting and clinical psychology, 84*(11), 946.
- Reigeluth, C. M. (1989). Educational technology at the crossroads: New mindsets and new directions. *Educational Technology Research and Development, 37*(1), 67-80.
- Rescorla, R. A., & Heth, C. D. (1975). Reinstatement of fear to an extinguished conditioned stimulus. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 1*(1), 88.
- Rezazadeh, I. M., Firoozabadi, M., & Wang, X. (2011). Evaluating the usability of virtual environment by employing affective measures. Dans *Mixed Reality and Human-Robot Interaction* (pp. 95-109). New York, NY: Springer.
- Riva, G., Davide, F., & IJsselsteijn, W. (2003). Being there: The experience of presence in mediated environments. *Being there: Concepts, effects and measurement of user presence in synthetic environments, 5*.
- Riva, G., Waterworth, J., & Murray, D. (2014). 1 Extending the Self through the Tools and the Others: a General Framework for Presence and Social Presence in Mediated Interactions. Dans *Interacting with Presence* (pp. 9-31). Varsovie, Pologne: Sciendo Migration.
- Rizzo, A., Cukor, J., Gerardi, M., Alley, S., Reist, C., Roy, M., ... Difede, J. (2015). Virtual reality exposure for PTSD due to military combat and terrorist attacks. *Journal of Contemporary Psychotherapy, 45*(4), 255-264.
- Rizzo, A., Newman, B., Parsons, T., Reger, G., Holloway, K., Gahm, G., ... Johnston, S. (2009). *Development and clinical results from the virtual Iraq exposure therapy application for PTSD*. Communication présentée au 2009 Virtual Rehabilitation International Conference.
- Rizzo, A., Pair, J., Graap, K., Manson, B., McNerney, P. J., Wiederhold, B., ... Spira, J. (2006). A virtual reality exposure therapy application for Iraq War military personnel with post traumatic stress disorder: From training to toy to treatment. *NATO Security through Science Series E Human and Societal Dynamics, 6*, 235.
- Rizzo, A., Roy, M. J., Hartholt, A., Costanzo, M., Highland, K. B., Jovanovic, T., ... Difede, J. (2017). Virtual reality applications for the assessment and treatment of PTSD. Dans *Handbook of Military Psychology* (pp. 453-471): Springer.

- Rizzo, A. A., Graap, K., Mclay, R. N., Perlman, K., Rothbaum, B. O., Reger, G., ... Pair, J. (2007). *Virtual Iraq: Initial case reports from a VR exposure therapy application for combat-related post traumatic stress disorder*. Communication présentée au 2007 Virtual Rehabilitation.
- Rothbaum, B. O., Anderson, P., Zimand, E., Hodges, L., Lang, D., & Wilson, J. (2006). Virtual reality exposure therapy and standard (in vivo) exposure therapy in the treatment of fear of flying. *Behavior therapy*, 37(1), 80-90.
- Rothbaum, B. O., & Davis, M. (2003). Applying learning principles to the treatment of post-trauma reactions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1008(1), 112-121.
- Rothbaum, B. O., Hodges, L., Alarcon, R., Ready, D., Shahar, F., Graap, K., ... Wills, B. (1999). Virtual reality exposure therapy for PTSD Vietnam veterans: A case study. *Journal of Traumatic Stress: Official Publication of The International Society for Traumatic Stress Studies*, 12(2), 263-271.
- Rothbaum, B. O., Hodges, L., Smith, S., Lee, J. H., & Price, L. (2000). A controlled study of virtual reality exposure therapy for the fear of flying. *Journal of consulting and Clinical Psychology*, 68(6), 1020.
- Rothbaum, B. O., Hodges, L., Watson, B. A., Kessler, G. D., & Opdyke, D. (1996). Virtual reality exposure therapy in the treatment of fear of flying: A case report. *Behaviour Research and Therapy*, 34(5-6), 477-481.
- Rothbaum, B. O., Hodges, L. F., Kooper, R., Opdyke, D., Williford, J. S., & North, M. (1995). Virtual reality graded exposure in the treatment of acrophobia: A case report. *Behavior therapy*, 26(3), 547-554.
- Rothbaum, B. O., Hodges, L. F., Ready, D., Graap, K., & Alarcon, R. D. (2001). Virtual reality exposure therapy for Vietnam veterans with posttraumatic stress disorder. *The Journal of clinical psychiatry*.
- Rothbaum, B. O., Ruef, A. M., Litz, B. T., Han, H., & Hodges, L. (2003). Virtual reality exposure therapy of combat-related PTSD: A case study using psychophysiological indicators of outcome. *Journal of Cognitive Psychotherapy*, 17(2), 163-178.
- Rothbaum, B. O., Ruef, A. M., Litz, B. T., Han, H., & Hodges, L. (2004). Virtual reality exposure therapy of combat-related PTSD: A case study using psychophysiological indicators of outcome. *Advances in the treatment of posttraumatic stress disorder: Cognitive-behavioral perspectives*, 93-112.
- Rubio-Tamayo, J. L., Gertrudix Barrio, M., & García García, F. (2017). Immersive environments and virtual reality: Systematic review and advances in communication, interaction and simulation. *Multimodal Technologies and Interaction*, 1(4), 21.

- Saldaña, J., & Omasta, M. (2016). *Qualitative research: Analyzing life*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Schimelpfening, N. (2018). Wait list control groups in psychology experiments. *Very well mind*.
- Schubert, T., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. (2001). The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10(3), 266-281.
- Schwarzer, R. (2014). *Self-efficacy: Thought control of action*. Abingdon-on-Thames, Royaume-Uni: Taylor & Francis.
- Sheridan, T. B. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1), 120-126.
- Sherman, W. R., & Craig, A. B. (2018). *Understanding virtual reality: Interface, application, and design*. Burlington, MA: Morgan Kaufmann.
- Sherrill, A. M., Rothbaum, A. O., McSweeney, L. B., & Rothbaum, B. O. (2019). Virtual Reality Exposure Therapy for Posttraumatic Stress Disorder. *Psychiatric Annals*, 49(8), 343-347.
- Skinner, B. F. (2011). *About behaviorism*. New York, NY: Vintage.
- Slater, M. (1999). Measuring presence: A response to the Witmer and Singer presence questionnaire. *Presence*, 8(5), 560-565.
- Slater, M. (2002). Course 49: Understanding Virtual Environments: Immersion. *Presence, and Performance. Siggraph*.
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(6), 603-616.
- Smetanin, P., Briante, C., Stiff, D., Ahmad, S., & Khan, M. (2015). *The life and economic impact of major mental illnesses in Canada*. Ottawa, ON: Mental Health Commission of Canada.
- Smith, J. D. (2012). Single-case experimental designs: a systematic review of published research and current standards. *Psychological methods*, 17(4), 510.
- Spronck, P., Ponsen, M., Sprinkhuizen-Kuyper, I., & Postma, E. (2006). Adaptive game AI with dynamic scripting. *Machine Learning*, 63(3), 217-248.
- Steuer, J. (1992). Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *Journal of communication*, 42(4), 73-93.

- Stewart, J. (2010). Foundational issues in enaction as a paradigm for cognitive science: From the origin of life to consciousness and writing. *Enaction: Toward a new paradigm for cognitive science*, 1-31.
- Straube, T., Glauer, M., Dilger, S., Mentzel, H.-J., & Miltner, W. H. (2006). Effects of cognitive-behavioral therapy on brain activation in specific phobia. *Neuroimage*, 29(1), 125-135.
- Sutcliffe, A., & Deol Kaur, K. (2008). A usability evaluation method for virtual reality user interfaces. *Centre for HCI Design, Department of Computation, UMIST*.
- Sutcliffe, A., & Gault, B. (2004). Heuristic evaluation of virtual reality applications. *Interacting with computers*, 16(4), 831-849.
- Sutcliffe, A. G., & Kaur, K. D. (2000). Evaluating the usability of virtual reality user interfaces. *Behaviour & Information Technology*, 19(6), 415-426.
- Sutcliffe, A. G., Poullis, C., Gregoriades, A., Katsouri, I., Tzanavari, A., & Herakleous, K. (2019). Reflecting on the design process for virtual reality applications. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 35(2), 168-179.
- Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological review*, 55(4), 189.
- Trappey, A., Trappey, C. V., Chang, C.-M., Kuo, R. R., Lin, A. P., & Nieh, C. (2020). Virtual Reality Exposure Therapy for Driving Phobia Disorder: System Design and Development. *Applied Sciences*, 10(14), 4860.
- Trappey, A., Trappey, C. V., Chang, C.-M., Tsai, M.-C., Kuo, R. R., & Lin, A. P. (2021). Virtual Reality Exposure Therapy for Driving Phobia Disorder (2): System Refinement and Verification. *Applied Sciences*, 11(1), 347.
- Tworus, R., Szymanska, S., & Ilnicki, S. (2010). A soldier suffering from PTSD, treated by controlled stress exposition using virtual reality and behavioral training. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 13(1), 103-107.
- Unity3D. (n.d.). Unity 3D. Repéré le 10 avril 2021, à <https://unity.com/>.
- U.S. Department of Transportation. (2016). How do weather events impact roads?^ *Road Weather Management Program* Repéré le 15 mai 2020, à https://ops.fhwa.dot.gov/weather/q1_roadimpact.htm.
- Van Ameringen, M., Mancini, C., Patterson, B., & Boyle, M. H. (2008). Post-traumatic stress disorder in Canada. *CNS neuroscience & therapeutics*, 14(3), 171-181.
- Van Rooij, M., Lobel, A., Harris, O., Smit, N., & Granic, I. (2016). *DEEP: A biofeedback virtual reality game for children at-risk for anxiety*. Communication présentée au Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems.

- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (2016). *The embodied mind: Cognitive science and human experience*. MIT press.
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (2017). *The embodied mind: Cognitive science and human experience (revised edition)*. : Cambridge, MA: MIT Press.
- Walshe, D., Lewis, E., O'Sullivan, K., & Kim, S. I. (2005). Virtually driving: are the driving environments "real enough" for exposure therapy with accident victims? An explorative study. *CyberPsychology & Behavior*, 8(6), 532-537.
- Walshe, D. G., Lewis, E. J., Kim, S. I., O'Sullivan, K., & Wiederhold, B. K. (2003). Exploring the use of computer games and virtual reality in exposure therapy for fear of driving following a motor vehicle accident. *CyberPsychology & Behavior*, 6(3), 329-334.
- Watson, J. B. (1913). Psychology as the behaviorist views it. *Psychological review*, 20(2), 158.
- Wiederhold, B. K., & Bouchard, S. (2014). *Advances in virtual reality and anxiety disorders*. New York, NY: Springer.
- Willans, T., Rivers, S., & Prasolova-Førland, E. (2016). Enactive emotion and presence in virtual environments. Dans *Emotions, Technology, and Behaviors* (pp. 181-210): Elsevier.
- Wilson, S., Guliani, H., & Boichev, G. (2016). On the economics of post-traumatic stress disorder among first responders in Canada. *Journal of Community Safety and Well-Being*, 1(2), 26-31.
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence*, 7(3), 225-240.
- Wood, D. P., Murphy, J., Center, K., McLay, R., Reeves, D., Pyne, J., ... Wiederhold, B. K. (2006). Combat-related post-traumatic stress disorder: A case report using virtual reality exposure therapy with physiological monitoring. *Cyberpsychology & Behavior*, 10(2), 309-315.
- Wood, D. P., Murphy, J. A., Center, K. B., Russ, C., McLay, R. N., Reeves, D., ... Wiederhold, B. K. (2008). Combat related post traumatic stress disorder: a multiple case report using virtual reality graded exposure therapy with physiological monitoring. *Studies in health technology and informatics*, 132, 556.
- Wood, D. P., Webb-Murphy, J., Center, K., McLay, R., Koffman, R., Johnston, S., ... Wiederhold, B. K. (2009). Combat-related post-traumatic stress disorder: A case report using virtual reality graded exposure therapy with physiological monitoring with a female Seabee. *Military medicine*, 174(11), 1215-1222.
- Zayfert, C., & Becker, C. B. (2006). *Cognitive-behavioral therapy for PTSD: A case formulation approach*. New York, NY: Guilford Press.

Zhang, T., Booth, R., Jean-Louis, R., Chan, R., Yeung, A., Gratzner, D., & Strudwick, G. (2020). A Primer on Usability Assessment Approaches for Health-Related Applications of Virtual Reality. *JMIR Serious Games*, 8(4), e18153.

Zheng, J., Chan, K., & Gibson, I. (1998). Virtual reality. *Ieee Potentials*, 17(2), 20-23.