

Université de Montréal

Système intelligent pour le suivi et l'optimisation de l'état cognitif

*Par*

Hamdi Ben Abdessalem

Département d'informatique et de recherche opérationnelle

Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D.)

en Informatique,

Avril, 2021

© Ben Abdessalem, 2021



Université de Montréal  
Faculté des Arts et des Sciences

---

*Cette thèse intitulée*

**Système intelligent pour le suivi et l'optimisation de l'état cognitif**

*Présenté par*

**Hamdi Ben Abdesslem**

*A été évaluée par un jury composé des personnes suivantes*

**Esma Aïmeur**  
Présidente

**Claude Frasson**  
Directeur de recherche

**Jian-Yun Nie**  
Membre du jury

**Stefano A. Cerri**  
Examineur externe

**Élaine De Guise**  
Représentante du Doyen



# Résumé

Les émotions des êtres humains changent régulièrement et parfois de manière brusque entraînant un changement de l'état mental c'est-à-dire de l'aptitude cérébrale à fonctionner normalement. Il en résulte une capacité cognitive (ou état cognitif) de l'individu à pouvoir raisonner, accéder à la mémoire, ou effectuer des déductions, variable selon l'état mental. Ceci affecte, en conséquence, les performances des utilisateurs qui varient en fonction de leurs état cognitifs. Cette thèse vise à optimiser l'état cognitif d'un utilisateur lors de ses interactions avec un environnement virtuel. Comme cet état dépend des émotions, l'optimisation de l'état cognitif peut être réalisée à travers l'optimisation des émotions et en particulier la réduction des émotions négatives.

Une première partie concerne les moyens de mesurer en temps réel (par un *Module de mesures*) l'état émotionnel et mental d'un utilisateur lors de ses interactions avec un environnement virtuel. Nous avons réalisé pour cela quatre études expérimentales avec quatre environnements différents. Nous avons montré que ces mesures peuvent être réalisées en utilisant différents capteurs physiologiques. Nous avons aussi montré qu'il est possible de prédire la tendance de l'excitation (un état mental) à partir d'un traceur de regard.

Dans une deuxième partie, nous présentons l'*Agent Neural* qui modifie les environnements virtuels afin de provoquer une modification de l'état émotionnel d'un utilisateur pour améliorer son état cognitif. Nous avons réalisé quatre études expérimentales avec quatre environnements virtuels, où l'*Agent Neural* intervient dans ces environnements afin de changer

l'état émotionnel de l'utilisateur. Nous avons montré que l'agent est capable d'intervenir dans plusieurs types d'environnements et de modifier les émotions de l'utilisateur.

Dans une troisième partie, présentons l'*Agent Limbique*, qui personnalise et améliore les adaptations faites par l'*Agent Neural* à travers l'observation et l'apprentissage des impacts des changements des environnements virtuels et des réactions émotionnelles des utilisateurs. Nous avons montré que cet agent est capable d'analyser les interventions de l'*Agent Neural* et de les modifier. Nous avons montré aussi que l'*Agent Limbique* est capable de générer une nouvelle règle d'intervention et de prédire son impact sur l'utilisateur.

La combinaison du *Module de mesures*, de l'*Agent Neural*, et de l'*Agent Limbique*, nous a permis de créer un système de contrôle cognitif intelligent que nous avons appelé Système Limbique Digital.

**Mots-clés** : Agent Intelligent, Système Limbique, Électroencéphalogramme, Traceur de Regard, Réalité Virtuelle, Apprentissage machine, Neurofeedback.

# Abstract

The human's emotions change regularly and sometimes suddenly leading to changes in their mental state which is the brain's ability to function normally. This mental state's changes affect the users' cognitive ability (or cognitive state) to reason, access memory, or make inferences, which varies depending on the mental state. Consequently, this affects the users' performances which varies according to their cognitive states. This thesis aims to optimize the users' cognitive state during their interactions with a virtual environment. Since this state depends on emotions, optimization of cognitive state can be achieved through the optimization of emotions and in particular the reduction of negative emotions.

In a first part, we present the means of measuring in real time (using a *Measuring module*) the users' emotional and mental state during their interactions with a virtual environment. We performed four experimental studies with four different environments. We have shown that these measurements can be performed using different physiological sensors. We have also shown that it is possible to predict the tendency of excitement (a mental state) using an eye tracker.

In a second part, we present the *Neural Agent* which modifies virtual environments to provoke a modification on the users' emotional state in order to improve their cognitive state. We performed four experimental studies with four virtual environments, in which the *Neural Agent* intervenes in these environments to change the users' emotional state. We have shown that the agent is able to intervene in several types of environments and able to modify the users' emotions.

In a third part, we present the *Limbic Agent*, which personalizes and improves the adaptations performed by the *Neural Agent* through the observation and the learning from the virtual environments changes' impacts and the users' emotional reactions. We have shown that this agent is able to analyze the *Neural Agent's* interventions and able to modify them. We have also shown that the *Limbic Agent* is able to generate a new intervention rule and predict its impact on the user.

The combination of the *Measuring Module*, the *Neural Agent*, and the *Limbic Agent*, allowed us to create an intelligent cognitive control system that we called the *Digital Limbic System*.

**Keywords** : Intelligent Agent, Limbic System, Electroencephalogram, Eye Tracker, Virtual Reality, Machine Learning.



# Table des matières

Résumé .....	i
Abstract .....	iii
Table des matières .....	v
Liste des tableaux .....	xiii
Liste des figures .....	xv
Liste des sigles et abréviations .....	xix
Remerciements .....	xxiii
Chapitre 1 - Introduction .....	1
1.1 Contexte général .....	1
1.2 Problématiques .....	4
1.2.1 Analyser et suivre en temps réel l'état émotionnel et mental d'un utilisateur lors des interactions avec un EV .....	5
1.2.2 Adapter les EVs afin d'optimiser l'état cognitif d'un utilisateur .....	6
1.2.3 Personnaliser et optimiser les adaptations dans les EVs pour chaque utilisateur et améliorer leurs impacts sur son état cognitif .....	6
1.3 Objectifs de recherche .....	7
1.4 Organisation du document .....	10
Partie I : Analyse et suivi en temps réel de l'état émotionnel et mental .....	13

Chapitre 2 - Mesures de l'état émotionnel et mental des utilisateurs lors des interactions avec des EVs .....	15
2.1 Mesures Physiologiques.....	15
2.1.1 Questionnaires d'auto-évaluation .....	15
2.1.2 Juges externes .....	16
2.1.3 Capteurs physiologiques .....	17
2.2 Capteurs physiologiques utilisés .....	18
2.2.1 Casque EEG: Emotiv Epoc Plus .....	19
2.2.2 Casque EEG: Neeuro SenzeBand .....	20
2.2.3 Casque de RV avec traceur de regard intégré : FOVE .....	20
2.3 Module de mesures.....	21
2.4 Environnements de validation et d'expérimentation .....	22
2.4.1 Inertia : Jeux sérieux en RV .....	23
2.4.2 <i>AmbuRun</i> : Jeux vidéo en RV avec modification en temps réel .....	24
2.4.3 Train Virtuel : un environnement thérapeutique en RV .....	24
2.4.4 <i>NetMath</i> : une plateforme d'apprentissage des mathématiques .....	26
Chapitre 3 - Relation entre le mouvement des yeux et l'excitation dans un jeu de RV adaptatif .....	29
How do Players' Eye Movements Relate to their Excitement in a VR adaptive Game?.....	31
3.1 Introduction.....	32
3.2 Related Works .....	33
3.2.1 Game Adaptation .....	33
3.2.2 Eye tracking and EEG.....	34
3.2.3 Virtual Reality Games .....	34

3.3	AmbuRun VR Game .....	35
3.4	Game Adaptation Approach and Physiological Measurement .....	36
3.4.1	Game Adaptation System .....	37
3.4.1.1	Measuring Module .....	37
3.4.1.2	Neural Agent .....	38
3.4.2	Physiological Measurement .....	38
3.4.2.1	EEG Measures .....	38
3.4.2.2	Eye Tracking Measurement in VR .....	39
3.5	Experiment .....	40
3.6	Results and Discussion .....	41
3.7	Conclusion .....	45
Partie II : Contrôle et amélioration de l'état cognitif .....		47
Chapitre 4 - Contrôle et Amélioration de l'état émotionnel et mental des utilisateurs à travers l'adaptation des EVs .....		49
4.1	Agents Intelligents .....	49
4.1.1	Agent réactif .....	51
4.1.2	Agent cognitif .....	51
4.1.3	Agent hybride .....	51
4.2	Agent Neural .....	52
4.2.1	Biofeedback et Neurofeedback .....	52
4.2.2	Fonctionnalités de l'Agent Neural .....	53
4.3	Environnements de validation et expérimentations .....	53
4.3.1	AmbuRun: Jeux vidéo en temps réel avec adaptation en temps réel .....	54
4.3.2	Hypocrates: Plateforme éducative en RV pour les étudiants en médecine .....	54

4.3.3	Hypocrates+: Hypocrates avec aide intelligente en temps réel .....	56
4.3.4	Savannah VR : un environnement thérapeutique en RV .....	58
Chapitre 5 -	Adaptation d'un jeu en RV en utilisant du neurofeedback .....	59
	Virtual Reality Game Adaptation using Neurofeedback .....	61
5.1	Introduction.....	62
5.2	Related Works .....	63
5.2.1	Brain Assessment and Neurofeedback .....	63
5.2.2	Virtual Reality .....	64
5.2.3	Adaptive Systems .....	65
5.3	AmbuRun: an adaptable VR game .....	65
5.4	Neurofeedback System .....	67
5.4.1	VR Environment.....	68
5.4.2	Measuring Module .....	68
5.4.3	Neural Agent .....	69
5.5	Experiment .....	72
5.5.1	Experimental protocol.....	72
5.6	Results and discussion.....	73
5.7	Conclusion .....	75
Chapitre 6 -	Optimisation de la thérapie pour des patients atteints de la maladie d'Alzheimer en utilisant un Agent Neural .....	77
	Optimizing Alzheimer's Disease Therapy using a Neural Intelligent Agent-Based Platform .....	81
6.1	Introduction.....	82
6.2	Related Works .....	83
6.2.1	Relaxation environment as treatment for Alzheimer's disease .....	83

6.2.1.1	Travel Theory .....	83
6.2.1.2	Music Theory.....	84
6.2.1.3	Savannah Theory.....	85
6.2.2	Virtual Reality .....	86
6.2.3	Adaptative systems and Intelligent Agents.....	87
6.2.4	Brain Assessment .....	87
6.3	Our Approach .....	88
6.4	Virtual Reality Train .....	89
6.5	Adaptive Music Therapy.....	91
6.5.1	Virtual Music Therapy .....	91
6.5.2	Music Adaptation Agent.....	92
6.6	Intelligent Savannah Therapy.....	92
6.6.1	Savannah VR.....	93
6.6.2	Neural Agent .....	94
6.7	Experiments.....	96
6.7.1	Attention Exercises.....	97
6.7.1.1	Exercise 1 .....	97
6.7.1.2	Exercise 2 .....	98
6.7.1.3	Exercise 3 .....	98
6.7.2	Memory Exercises .....	98
6.7.2.1	Exercise 4 .....	98
6.7.2.2	Exercise 5 .....	99
6.7.2.3	Exercise 6 .....	99
6.7.3	Brain Assessment using EEG measures.....	100

6.8	Results and discussion.....	100
6.8.1	Therapeutic Train .....	100
6.8.2	Adaptive Music Therapy.....	103
6.8.3	Intelligent Savannah Therapy.....	107
6.8.4	Overall Results.....	110
6.8.5	Work Limitations .....	111
6.9	Conclusions and Future Works.....	112
Partie III : Système de contrôle cognitif Intelligent.....		115
Chapitre 7 - Personnalisation de la thérapie pour la maladie d'Alzheimer .....		117
Toward personalizing Alzheimer's Disease Therapy using an Intelligent Cognitive Control System .....		121
7.1	Introduction.....	122
7.2	Related Works .....	123
7.2.1	Brain Assessment .....	123
7.2.2	Intelligent Agents and adaptation.....	124
7.2.3	Virtual Reality and relaxing environments.....	124
7.3	Our approach: Intelligent Cognitive Control System .....	125
7.3.1	Savannah VR.....	125
7.3.2	Neural Agent .....	126
7.3.3	Limbic Agent.....	128
7.4	Experiments.....	130
7.4.1	Process of the experiments.....	130
7.5	Results and Discussion .....	132
7.6	Conclusion and Future Work.....	136

Chapitre 8 -	Système Limbique Digital .....	139
8.1	Système Limbique et Émotions.....	139
8.2	Architecture Globale du Système Limbique Digital .....	141
8.3	Similarités entre SLH et SLD .....	145
Chapitre 9 -	Conclusion .....	147
9.1	Contributions.....	147
9.2	Travaux futurs .....	151
Références bibliographiques.....		153
Publications .....		169
Article de Journaux.....		169
Article de Conférences .....		169





## Liste des tableaux

Table 3.1 - ANOVA Eye distance.....	43
Table 3.2 - ANOVA excitement (More detailed study of this result could be found in (Ben Abdesslem et al., 2018b)).....	43
Table 5.1 - ANOVA results .....	75
Table 6.1 - ANOVA Mean Frustration (VR Train).....	102
Table 6.2 - Mean performance improvement (VR Train).....	103
Table 6.3 - ANOVA Mean Frustration (AMT).....	104
Table 6.4 - Mean performance improvement (AMT). .....	105
Table 6.5 - ANOVA Mean Frustration (IST). .....	108
Table 6.6 - Mean performance improvement (IST). .....	109
Table 6.7 - Comparison of mean frustration.....	111
Table 6.8 - Comparison of mean memory performance improvement. ....	111
Table 7.1 - Classification reports of tested algorithms .....	135
Table 7.2 - Confusion matrix of tested algorithms.....	136



## Liste des figures

Figure 2.1 - Les cinq plages de fréquence du signal EEG (Abo-Zahhad et al., 2015) .....	18
Figure 2.2 - Casque Epop plus et positionnement des électrodes .....	19
Figure 2.3 - Casque Neeuro Senze Band .....	20
Figure 2.4 - Casque FOVE : RV + Suivi du regard .....	21
Figure 2.5 - Architecture du Module de mesures (Ben Abdessalem et Frasson, 2017) - traduite en français .....	22
Figure 2.6 - Capture du jeu « Inertia » .....	23
Figure 2.7 - Capture de l'environnement « Train Virtuel » (Ben Abdessalem et al., 2020).....	25
Figure 2.8 - Exemple d'un exercice de mathématiques difficile de <i>NetMath</i> (Ghali et al., 2018).26	
Figure 2.9 - EEG acquisition process (Ghali et al., 2018).....	27
Figure 3.1 - Screen Capture of AmbuRun VR Game.....	36
Figure 3.2 - Screen Capture of the Measuring Module.....	37
Figure 3.3 - Emotiv Headset Sensors Placement.....	38
Figure 3.4 - Screen Capture of Fove Interface .....	39
Figure 3.5 - Process of the Experiment .....	41
Figure 3.6 - Histogram of Mean Eyes Distance Before and After Adapting the Game .....	42
Figure 3.7 - Boxplot of R Score Correlation for all the Participants .....	44

Figure 4.1 - L'interaction d'agent intelligent avec son environnement (Russell et Norvig, 1995)	50
Figure 4.2 - Système biofeedback basique (Moss, 2002)	52
Figure 4.3 - Architecture de Hypocrates (Ben Abdessalem et al., 2018a)	54
Figure 4.4 - Exemple d'un cas médical (Ben Abdessalem et al., 2018a)	55
Figure 5.1 - Screen capture of AmbuRun (difficulty = easy)	66
Figure 5.2 - Screen capture of AmbuRun (difficulty = hard)	67
Figure 5.3 - Architecture of the neurofeedback system	71
Figure 5.4 - Process of the experiment	73
Figure 5.5 - Descriptive results of players' report	74
Figure 6.1 - Architecture of our approach.	89
Figure 6.2 - Screen capture of the virtual train.	90
Figure 6.3 - Screen capture of the virtual train (second environment).	90
Figure 6.4 - Screen capture of Virtual Music Therapy environment for two different songs.	92
Figure 6.5 - Screenshots of Savannah VR.	93
Figure 6.6 - Architecture of the Neural Agent.	95
Figure 6.7 - Process of the experiments.	97
Figure 6.8 - Screenshot of attention exercise 3.	98
Figure 6.9 - Screenshot of exercise 4.	99
Figure 6.10 - Screenshot of exercise 6.	99
Figure 6.11 - Emotiv headset sensors placement.	100
Figure 6.12 - Participants' level of frustration before, during and after VR Train.	101
Figure 6.13 - Performance improvement for attention and memory exercises (VR Train).	102
Figure 6.14 - Participants' level of frustration before, during and after AMT.	104
Figure 6.15 - Performance improvement for attention and memory exercises (AMT).	105
Figure 6.16 - Histogram of mean frustration level before and after agent's adaptation in AMT.	106
Figure 6.17 - Participants' level of frustration before, during and after IST.	107

Figure 6.18 - Performance improvement for attention and memory exercises (IST). .....	108
Figure 6.19 - Histogram of mean frustration level before and after agent's adaptation in IST. .	110
Figure 7.1 - Screenshots of Savannah VR (Dakoure et al., 2020).....	125
Figure 7.2 - Architecture of the Neural Agent (Ben Abdessalem et al., 2021). .....	127
Figure 7.3 - Architecture of the Limbic Agent and its interaction with the system.....	129
Figure 7.4 - Process of the experiment. ....	132
Figure 7.5 - Histogram of the number of worked vs not worked intervention rules. ....	133
Figure 8.1 - Emplacement des parties du Système Limbique. ....	140
Figure 8.2 - Architecture Globale du SLD. ....	143



## Liste des sigles et abréviations

IA: Intelligence Artificielle

RV: Réalité Virtuelle

EV: Environnement Virtuel

EEG: Électroencéphalogrammes

EDA: activité électrodermale

SA: Système Adaptatif

SLD: Système Limbique Digital

SLH: Système Limbique Humain

DCS: Déclin Cognitif Subjectif

SDK: Software Development Kit

ANOVA: Analysis of Variance

t-test: Student Test

SVM: Support Vector machines

KNN: K-Nearest Neighbors

UDP: User Datagram Protocol





*À mes très chers parents, mon épouse Marwa et ma fille Lilia*



## Remerciements

Je voudrais exprimer mes remerciements à mon directeur de recherche, le professeur Claude Frasson pour les conseils avisés et précieux qu'il m'a fournis durant mes travaux, pour sa supervision et son expertise qui m'ont beaucoup aidé tout au long de cette thèse.

Je remercie le NSERC (National Science and Engineering Research Council), BMU (Beam Me Up), et Prompt pour avoir supporté financièrement mon projet.

Je tiens à remercier les membres du laboratoire HERON et GRITI de l'Université de Montréal qui m'ont aidé de près ou de loin tout au long de cette thèse. J'adresse une pensée particulière à Maher Chaouachi, Marwa Boukadida, Sahbi Benlamine, Asma Ben Khedher, Ramla Ghali, Alexie Byrns, Qiang Ye, Caroline Dakouré et Yan Ai qui ont participé à certains travaux de cette thèse.

J'exprime aussi mes sincères remerciements à ma mère Leila et mon père Abdelmajid qui m'ont encouragé et soutenu durant tout mon parcours académique. Je remercie aussi mon épouse Marwa pour son encouragement, son soutien et sa patience tout au long de cette thèse. Je remercie aussi mes sœurs Afef et Raja et mon frère Hamza pour leurs encouragements.

Je remercie également Dr. Makram Mestiri, les professeurs de l'ISAMM et les professeurs de l'UdeM et tous ceux qui ont contribué à ma formation avant de commencer et durant cette thèse.



# Chapitre 1 - Introduction

## 1.1 Contexte général

Cette thèse s'inscrit dans le cadre des travaux de recherche menés dans le laboratoire HERON (Higher Educational Research ON Tutoring Systems). Ce laboratoire s'intéresse à plusieurs disciplines telles que l'intelligence artificielle (IA), la psychologie cognitive, les neurosciences, les interfaces intelligentes ainsi qu'à leurs applications dans différents domaines de l'apprentissage tels que la médecine, les jeux sérieux, l'analyse du raisonnement, l'amélioration des capacités cognitives en se basant principalement sur les Interactions Homme-Machine, pour améliorer les performances des utilisateurs (exemple : apprenants, patients, etc.).

Les performances d'un utilisateur lors de son interaction avec des applications ou des environnements varient en fonction de son état mental. Des études ont montré que les émotions sont impliquées dans tous les processus cognitifs, et ont un impact direct sur la mémorisation, le raisonnement et l'attention (Bechara et al., 2000; Damasio, 1994; Evans, 2001). En fait, les émotions d'un utilisateur conditionnent son **état mental** c'est-à-dire l'état de ses ressources cérébrales pour accomplir des tâches de raisonnement ou d'accès à la mémoire. Par exemple un utilisateur peut être dans un état de charge mentale élevée (état de saturation) ou de confusion qui l'empêche de trouver une solution. Cet état qui est un degré de conscience, de vigilance et d'alerte des individus peut être affecté par plusieurs conditions externes ou internes (Conn, 1977). Cet état conduit à des capacités cognitives, ou **état cognitif**, plus ou moins performantes et qui se traduiront par des résultats en termes de déduction ou de mémorisation. Cet état se mesure par des tests cognitifs.

Dans le domaine éducatif, des études ont montré que les émotions ressenties par l'apprenant et le processus d'apprentissage sont fortement liés (Clare et Huntsinger, 2007; Loewenstein et Lerner, 2003; Mega et al., 2014). Par exemple, si l'apprenant est dans un état émotionnel de stress, ceci peut créer un blocage mental de ses capacités à assimiler le contenu pédagogique présenté avec perte de mémoire lors des examens et donc affecter ses performances. Dans le domaine médical et plus précisément la maladie d'Alzheimer, plus la maladie progresse, plus les patients ressentent une augmentation de leurs émotions négatives (Lawton et al., 1996). Cette variation des émotions et états mentaux affecte leurs performances cognitives; plus les émotions négatives s'intensifient, plus les performances cognitives et plus précisément la mémorisation diminuent (Ben Abdesslem et al., 2020; Byrns et al., 2020a).

Vu l'importance des émotions à l'état mental des utilisateurs, plusieurs études ont démontré l'efficacité de l'utilisation des capteurs physiologiques pour détecter les émotions (Bhardwaj et al., 2015; Chakladar et Chakraborty, 2018; Horlings et al., 2008). Parmi les capteurs physiologiques les plus utilisés, nous mentionnons les électroencéphalogrammes (EEG) qui ont été utilisés dans certaines études pour mesurer les émotions des apprenants dans le but de les garder dans un état mental positif lors de leur apprentissage (Chaouachi et al., 2015b, 2015a). Les expressions faciales sont un autre type de capteurs physiologiques qui permet la reconnaissance et classification des émotions à partir d'une caméra (Pitaloka et al., 2017). Un autre type de capteurs physiologiques est le suivi du regard qui permet aussi de détecter certaines émotions (D'Mello et al., 2012). L'utilisation de ces capteurs physiologiques afin de détecter et de suivre les émotions des apprenants ou des patients est importante parce qu'elle permet à la machine de comprendre ce que l'utilisateur ressent et d'adapter l'application ou le système dans le but d'améliorer son état mental. Certains états mentaux comme la charge mentale (Workload), l'engagement, l'excitation, la distraction, la confusion, peuvent se mesurer aussi par des EEG.

Les systèmes adaptatifs (SA) sont utilisés dans de nombreux domaines pour offrir des expériences personnalisées à chaque utilisateur, par exemple, dans le domaine de l'apprentissage, ils ont été utilisés afin de maintenir les utilisateurs dans un état mental d'engagement positif tout en apprenant (Chaouachi et al., 2015a). Plusieurs recherches ont utilisé des agents intelligents afin de créer des SA. Les agents intelligents ont une capacité d'autonomie

et sont capables d'agir dans un environnement afin d'atteindre des objectifs précis en prenant en considération des ressources et des capacités et en communiquant avec d'autres agents ou programmes (Ferber et Perrot, 1995). De nombreux chercheurs ont utilisé les agents intelligents pour adapter leurs systèmes dans le domaine des jeux vidéo (Rugaber et al., 2013). D'autres chercheurs les ont utilisés pour adapter leurs systèmes aux apprenants (Peña et al., 2002). Dans le domaine médical, des agents intelligents ont été utilisés pour surveiller les patients atteints de démence vivant chez eux. Des règles d'adaptation sont appliquées pour faciliter l'ajustement à court terme des comportements habituels des patients et le suivi à long terme des changements de comportement (Doctor et al., 2014).

Les environnements de réalité virtuelle (RV) permettent des interactions avec l'utilisateur par divers canaux sensoriels (exemple: la vision, les interactions haptiques, acoustiques, etc.). Ces interactions fournissent à l'utilisateur une illusion sensorimotrice qui lui donne le sentiment de présence dans l'environnement virtuel (EV) (Bohil et al., 2011). L'un des avantages de la RV, par rapport aux autres environnements interactifs, est que l'utilisateur est isolé de toute distraction visuelle externe. Un autre avantage est l'immersion qui peut faire croire à l'utilisateur qu'il est dans un monde réel et favorise ses capacités et ses performances cognitives (Biocca, 2006).

Le Système Limbique Humain (SLH) est la partie du cerveau qui gère et régularise les émotions (Papez, 1937). Le rôle du SLH est très important car, mise à part la régularisation des émotions, il gère en partie l'accès à la mémoire et la création de nouveaux souvenirs. Cependant, le SLH peut mal fonctionner pour plusieurs raisons. Par exemple, le SLH des patients avec un stade avancé de la maladie d'Alzheimer n'arrive pas à régulariser leurs émotions ce qui affecte leur état cognitif et rend l'accès à la mémoire difficile (Catani et al., 2013). Quand il le peut, le SLH régularise les émotions en générant des hormones. Lorsqu'il n'arrive pas à régulariser les émotions, une des solutions que les médecins utilisent est l'administration de médicaments. Afin d'aider et d'assister le SLH à bien régulariser les émotions par d'autres moyens non médicaux, il est important d'analyser son fonctionnement spécifique comme nous le verrons au chapitre 8.

## 1.2 Problématiques

Les performances d'un utilisateur varient en fonction de son état émotionnel, selon qu'il est frustré, heureux ou excité, etc., les performances ne vont pas être les mêmes. Dans le cas d'un apprenant, s'il est dans un état émotionnel négatif (stressé, frustré, etc.) cela affecte son état mental et il ne pourra pas acquérir et traiter les informations convenablement et d'une façon optimale. De même le patient qui souffre de la maladie d'Alzheimer éprouve beaucoup plus d'émotions négatives que les personnes non-malades ce qui affecte ses capacités cognitives et surtout ses capacités à accéder à la mémoire. Dans le cas des jeux vidéo, le joueur ne va pas être performant si son état mental n'est pas optimal. Par exemple s'il n'est pas engagé ou si son cerveau est saturé, il ne va pas être performant dans le jeu et ses réactions et son raisonnement ne vont pas être optimaux, donc il n'est pas évident de juger ses capacités vu qu'il est déjà fatigué.

Les réactions émotionnelles et mentales d'un utilisateur (quel que soit l'apprenant, le patient ou le joueur) lors de ses interactions avec un EV varient selon son état émotionnel et mental précédent et selon les changements de l'EV. De ce fait, il est important de pouvoir mesurer ces réactions émotionnelles et les suivre en temps réel car elles conduisent à un état mental qui va être à l'origine de la capacité cognitive du cerveau à assurer ou non des tâches cognitives. Par exemple, à la suite d'émotions négatives, une émotion d'insatisfactions comme la frustration va apparaître et contribuer à un état mental de confusion, qui à son tour, va entraîner une réduction des capacités cognitives. La mesure de l'état émotionnel et mental d'un utilisateur permet à la machine de comprendre l'état dans lequel il se trouve. La reconnaissance d'émotions faciales ou le recours à des EEG permettent de le faire. Toutefois, si l'utilisation de la RV procure aux utilisateurs un avantage d'immersion et donne un aspect réel aux EVs, l'utilisation d'un casque RV crée une contrainte au niveau de l'utilisation de la reconnaissance d'émotions faciales vu que la moitié du visage sera cachée. Il est donc important de trouver les outils de mesures qui peuvent fonctionner en même temps que l'environnement de RV afin de ne pas perdre les avantages que celle-ci apporte. Il faut aussi utiliser des outils de mesures qui sont appropriés à chaque profil d'utilisateur; nous ne pouvons pas, par exemple, utiliser n'importe quel équipement avec des enfants.



Lors des interactions avec des EVs, les émotions et l'état mental des utilisateurs changent dépendamment de ce qui se passe dans l'EV. Vu que l'état mental d'un utilisateur affecte ses performances lors de ses interactions, Il est important de contrôler et agir sur son état émotionnel et mental afin d'optimiser son état cognitif.

Chaque intervention et modification dans les EVs a un impact sur l'état émotionnel et mental de l'utilisateur mais de façons différentes. Une modification peut avoir un effet positif sur un utilisateur et un effet négatif sur un autre. Afin d'optimiser l'état cognitif de chaque utilisateur, il est important d'analyser et de connaître l'impact des modifications de l'EV sur les réactions émotionnelles et mentales résultantes dans le but d'améliorer et de personnaliser les interventions dans l'EV.

Les problèmes de recherche étudiés dans cette thèse visent donc principalement à :

- a) Analyser et suivre en temps réel les émotions des utilisateurs lors des interactions avec des EVs.
- b) Adapter les EV selon l'état émotionnel des utilisateurs afin de modifier leurs états cognitifs.
- c) Personnaliser et optimiser les adaptations dans les EVs pour chaque utilisateur et améliorer leur impact sur son état cognitif.

### **1.2.1 Analyser et suivre en temps réel l'état émotionnel et mental d'un utilisateur lors des interactions avec un EV**

Il est difficile d'analyser les états émotionnels d'un utilisateur lors de ses interactions avec un EV ou même un environnement réel. Les EVs pouvant être soit des jeux vidéo, soit des applications éducatives ou encore des applications médicales, reproduisent des phénomènes réels, et grâce à l'immersion de la RV les EVs ressemble beaucoup aux environnement réels (Biocca, 2006). Dans cette thèse on s'intéresse aux mesures des émotions lors des interactions avec un environnement de RV car il est plus facile de faire varier ses composantes en temps réel que dans un environnement réel. Par exemple, nous pouvons changer la météo (pluie, vent, neige, etc.) dans

un EV afin de provoquer des émotions, alors que cela n'est pas possible dans un environnement réel.

### **1.2.2 Adapter les EVs afin d'optimiser l'état cognitif d'un utilisateur**

Les modifications dans un EV peuvent se présenter sous plusieurs formes. Nous pouvons intervenir dans l'environnement en ajoutant un objet, un effet, du texte, des voix, de la musique, etc. Nous pouvons également changer tout l'EV si cela s'avère nécessaire. Chaque modification peut avoir un impact sur l'état émotionnel et mental; par exemple l'impact d'un environnement sombre n'est pas le même qu'un environnement relaxant. De plus, une modification dans l'EV peut avoir des impacts différents sur un même utilisateur dépendamment de son état émotionnel, mental et donc cognitif. Par conséquent, il est important d'intervenir et de modifier l'EV en se basant sur l'état émotionnel et mental initial des utilisateurs dans le but de l'améliorer selon la situation en utilisant des règles d'intervention. Par exemple, comme les performances des joueurs dans un jeu vidéo varient selon leurs expériences, rendre le jeu difficile peut améliorer les émotions d'un joueur qui trouve le jeu plus amusant en étant plus difficile et peut par contre générer des émotions négatives pour le joueur qui trouve le jeu très difficile et frustrant.

### **1.2.3 Personnaliser et optimiser les adaptations dans les EVs pour chaque utilisateur et améliorer leurs impacts sur son état cognitif**

L'impact des interventions sur l'EV varie d'un utilisateur à un autre. Après avoir analysé l'impact de ces interventions sur l'état émotionnel et mental de chaque utilisateur, il est important de pouvoir modifier les règles d'intervention existantes et de générer des nouvelles règles d'intervention afin de personnaliser et optimiser l'effet de ces interventions. Il est nécessaire d'apprendre à partir des interactions entre l'EV et les réactions émotionnelles de chaque utilisateur. Cet apprentissage nous permettra de générer de nouvelles règles d'interventions pour améliorer l'état cognitif de l'utilisateur.

## 1.3 Objectifs de recherche

Plus spécifiquement nos objectifs sont les suivants :

### 1. Suivi en temps réel de l'état émotionnel et mental d'un utilisateur lors des interactions avec un EV.

Notre premier objectif consiste à détecter et suivre l'état émotionnel et mental d'un utilisateur lors de son interaction avec un EV. L'utilisateur peut être un élève en école primaire, un étudiant en médecine, un patient Alzheimer ou encore un joueur de jeux vidéo. Nous optons pour l'utilisation de capteurs physiologiques afin de mesurer les émotions des utilisateurs mais étant donné que leurs profils sont différents, nous envisageons d'utiliser différents capteurs physiologiques convenables pour chaque utilisateur et chaque situation. Par exemple, l'utilisation d'un casque EEG léger avec des élèves en primaire est moins intrusif qu'un casque EEG qui couvre toute la tête et qui peut lui-même générer des émotions négatives.

### 2. Amélioration de l'état cognitif de l'utilisateur à travers l'adaptation des EVs.

Notre deuxième objectif consiste à modifier l'EV afin de provoquer la modification de l'état émotionnel d'un utilisateur pour améliorer son état cognitif. Chaque environnement est différent, et selon le domaine d'application, l'optimisation de l'état cognitif diffère aussi. Pour cette raison, nous envisageons de créer un agent intelligent capable d'adapter l'environnement en utilisant une base de règles d'interventions.

### 3. Personnalisation et amélioration de l'adaptation de l'EV par apprentissage machine.

Notre troisième objectif consiste à personnaliser et améliorer les adaptations faites dans le deuxième objectif à travers l'observation et l'apprentissage des interactions entre les changements des EVs et les réactions émotionnelles des utilisateurs. L'amélioration et la personnalisation peuvent être sous la forme d'une nouvelle règle d'intervention ou bien une modification d'une règle existante.

Pour répondre au **premier objectif**, qui est le suivi en temps réel de l'état émotionnel et mental d'un utilisateur lors de ses interactions avec un EV, nous avons créé un *Module de mesures*

à partir de plusieurs capteurs physiologiques. Nous avons développé un premier environnement de validation sous la forme d'un jeu sérieux en RV nommé *Inertia* et nous avons réalisé une première étude où nous avons utilisé un casque EEG et casque de RV mobile. Cette étude vise à expérimenter notre *Module de mesures* avec un environnement de RV et à investiguer l'utilisation des stratégies d'intervention pour le raisonnement intuitif. Nous avons utilisé le kit de développement logiciel (en anglais : Software Development Kit (SDK)) fourni avec le casque afin d'extraire les émotions et état mentaux des utilisateurs. Pour consolider l'approche nous avons développé un autre environnement de validation sous forme d'un jeu vidéo en RV nommé *AmbuRun* et nous avons réalisé une deuxième étude où nous avons utilisé le même casque EEG que lors de la première étude mais en plus avec un nouveau casque de RV équipé d'un traceur de regard. Cette étude vise à valider le bon fonctionnement du *Module de mesures* et investiguer la relation entre l'excitation (état mental) et les mouvements des yeux. Nous avons ensuite utilisé les données de cette étude afin d'entraîner un modèle qui prédit la tendance de l'excitation à partir des mouvements des yeux seulement. Nous avons, par la suite, développé un troisième environnement de validation sous la forme d'un environnement de RV thérapeutique pour les patients atteints de la maladie d'Alzheimer nommé *Virtual Train*. Nous avons réalisé une troisième étude où nous avons utilisé le même équipement que l'étude précédente. Cette étude vise à évaluer l'effet de l'environnement *Virtual Train* sur les émotions des participants et son impact sur leurs performances cognitives en utilisant notre *Module de mesures*. Finalement, nous avons réalisé une quatrième étude avec la plateforme d'apprentissage *NetMath* où nous avons utilisé un deuxième casque EEG moins intrusif que celui utilisé avant. Cette étude vise à repérer les élèves surdoués en utilisant notre *Module de mesures*. Ces études réalisées avec plusieurs environnements dans plusieurs domaines et avec des utilisateurs différents nous permettent de valider notre *Module de mesures* et d'améliorer son fonctionnement après chaque étude.

Pour répondre à notre **deuxième objectif**, qui est l'optimisation de l'état cognitif à travers des modifications de l'environnement, nous avons développé un *Agent Neural* capable d'intervenir sur les EVs selon l'état émotionnel ou mental d'un utilisateur en utilisant des règles d'interventions. Nous avons réalisé une première étude avec le jeu *AmbuRun* où l'*Agent Neural* intervient dans le but d'optimiser les niveaux de frustration et d'excitation des joueurs. Cette

optimisation a pour but d'améliorer l'expérience de jeux vidéo et de maximiser le plaisir du joueur. Nous avons réalisé une deuxième étude avec une application qui vise à tester les connaissances des étudiants en médecine : *Hypocrates*. Dans cette étude, l'*Agent Neural* intervient dans *Hypocrates* afin de provoquer un état de stress et frustration s'il détecte que la tâche est trop facile pour l'étudiant. Cette intervention a pour but de tester les performances d'un étudiant en médecine lors d'un état de stress. Finalement, nous avons réalisé une troisième étude dans laquelle nous avons utilisé l'environnement relaxant *Savannah VR* qui vise à relaxer les patients Alzheimer afin d'améliorer leurs performances cognitives. Dans cette étude, l'*Agent Neural* intervient dans *Savannah VR* afin d'adapter l'environnement aux patients pour optimiser l'effet de relaxation et réduire les émotions négatives. Nous avons aussi mesuré leurs performances cognitives avant et après l'environnement de relaxation.

Pour répondre à notre **troisième objectif**, qui est la personnalisation et l'amélioration de l'adaptation des EVs par apprentissage, nous avons développé un agent intelligent nommé *Agent Limbique*. Cet agent est appelé ainsi car il est inspiré des parties les plus importantes du SLH qui régularise les émotions. En effet, la régulation des émotions chez un humain se fait en théorie par le SLH mais, dans la réalité celui-ci n'arrive pas toujours à régulariser parfaitement les émotions ce qui nécessite parfois l'usage de médicaments (anxiolytiques). L'idée est de lui substituer un système limbique digital (SLD) capable d'assurer les mêmes fonctions à l'aide de cet agent. Cet agent est capable d'observer les interactions entre les interventions de l'*Agent Neural* sur des EVs et les réactions émotionnelles des utilisateurs après chaque intervention. Par la suite, il analyse ces interactions et régularise les interventions en modifiant les règles existantes et en produisant de nouvelles règles d'intervention. Cet *Agent Limbique* possède la capacité d'apprentissage à travers l'apprentissage machine; en effet, il apprend des anciennes interventions et des réactions émotionnelles afin de prédire l'impact des nouvelles règles d'intervention. Nous avons utilisé les données de l'étude réalisée avec l'environnement de RV relaxant *Savannah VR* afin de créer l'*Agent Limbique*, testé ces modules et entraîné son modèle de prédiction de l'impact émotionnel d'une règle d'intervention.

Vu que l'état émotionnel affecte directement l'état cognitif d'un utilisateur, la combinaison du *Module de mesures*, de l'*Agent Neural*, et de l'*Agent Limbique* nous permet de

créer un SLD capable d'optimiser l'état cognitif d'une personne d'une façon intelligente tout en assistant le système limbique humain qui gère les émotions et affecte la cognition.

## 1.4 Organisation du document

Cette thèse est organisée comme suit :

La **première partie**, qui inclut les chapitre 1 et 2, est consacrée à l'analyse et au suivi en temps réel de l'état émotionnel qui est notre premier objectif de recherche. Dans le chapitre 2, nous nous intéressons tout d'abord aux différents types de mesures physiologiques et de capteurs disponibles que nous pouvons utiliser. Puis, nous décrivons notre approche à base de senseurs physiologiques pour analyser et suivre l'état émotionnel des utilisateurs ainsi que les environnements de test et les expériences réalisées. Le chapitre 3 est présenté sous la forme d'un article de recherche publié dans la conférence « *The Thirty-Second International Florida Artificial Intelligence Research Society* » (FLAIRS-32) et qui présente une approche de détection de l'excitation à partir du suivi du regard.

La **deuxième partie** est consacrée au contrôle et à l'amélioration de l'état cognitif. Cette partie inclut le chapitre 4, 5 et 6. Dans le chapitre 4, nous nous intéressons en premier lieu aux différents types d'agents intelligents afin de détailler leurs caractéristiques et nous décrivons notre approche basée sur un agent intelligent qui vise à améliorer l'état cognitif d'un utilisateur. Nous détaillons aussi les différentes expériences et environnements de tests réalisés. Dans le chapitre 5, nous présentons un article de recherche publié dans la conférence « *The Thirty-First International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference* » (Flairs-31) qui détaille l'utilisation de notre agent intelligent dans un jeu vidéo afin de maximiser le plaisir. Dans le chapitre 6, nous présentons un article publié dans le journal « *International Journal of Intelligence Science* » (IJIS) qui détaille l'utilisation de l'*Agent Neural* avec un environnement relaxant afin d'optimiser les émotions de patients atteints de la maladie d'Alzheimer et ainsi améliorer leurs performances de mémorisation.

La **troisième et dernière partie** est consacrée à la personnalisation et l'amélioration de l'adaptation des EVs par apprentissage machine. Elle montre la structure de l'*Agent Limbique* et

du SLD destiné à assister le SLH Dans cette partie, nous présentons au chapitre 7 un article de conférence soumis à la conférence « *1st International Conference On Novelities In Intelligent Digital Systems* » (NIDS2021) qui détaille notre *Agent Limbique*. Dans le chapitre 8 nous détaillons l'architecture globale du SLD qui regroupe finalement les contributions de cette thèse dans un seul système intelligent.

En conclusion, le chapitre 9 résume les contributions de cette thèse, les limites de nos travaux et les perspectives de nos recherches.





**Partie I : Analyse et suivi en temps réel de l'état émotionnel  
et mental**



## **Chapitre 2 - Mesures de l'état émotionnel et mental des utilisateurs lors des interactions avec des EVs**

Afin de répondre à notre premier objectif de recherche qui consiste à analyser et suivre en temps réel l'état émotionnel et mental d'un utilisateur, nous nous intéressons aux différents types de mesures physiologiques. Une personne peut exprimer son état émotionnel et mental de plusieurs manières: ses expressions faciales changent, sa tonalité de la voix se transforme, ses gestes changent, sa fréquence cardiaque peut augmenter ou diminuer, etc. La personnalité de l'individu et l'environnement qui l'entoure affectent ses réactions physiologiques. Nous distinguons deux types de mesures pour la reconnaissance des émotions et états mentaux. Le premier type concerne les mesures subjectives qui permettent à l'individu d'indiquer par lui-même son propre état en répondant à un questionnaire par exemple, ou bien il peut être jugé par des juges externes. Le deuxième type de mesures concerne les mesures objectives qui permettent la détection des émotions et la reconnaissance des états mentaux sans consulter l'avis de l'individu. Il existe divers outils de mesures que nous détaillons dans ce qui suit.

### **2.1 Mesures Physiologiques**

#### **2.1.1 Questionnaires d'auto-évaluation**

Les questionnaires d'auto-évaluation peuvent être des questionnaires simples qui proposent juste plusieurs choix que l'individu doit sélectionner, ou bien des questionnaires complexes qui s'intéressent à la psychologie de la personne. Nous utilisons alors les résultats de ces questionnaires pour faire la modélisation des émotions à l'aide de plusieurs approches. L'échelle des émotions différentielles « *Differential emotions scale* » (Izard, C.E., 1993), est un exemple de

l'approche discrète qui vise à dégager une émotion globale pour chaque individu. Cet exemple utilise un questionnaire composé de 30 adjectifs correspondant à 10 états émotionnels évalués sur une échelle de 1 à 5 points. Il existe aussi une autre approche qui est l'approche dimensionnelle. Elle se base sur les trois dimensions suivantes : la valence (positive/négative), l'activation (faible/forte) et la dominance (contrôlé / non contrôlé). Le « *Self-Assessment Manikin scale* » (Bradley et Lang, 1994) est un exemple d'utilisation de cette approche qui se base sur une échelle graphique en utilisant des figurines qui représentent les trois dimensions mentionnées ci-dessus.

En utilisant les questionnaires d'auto-évaluation il n'est pas possible de suivre les émotions des utilisateurs en temps réel, donc cette méthode ne sera pas utilisable pour le suivi des émotions, par contre, nous pouvons l'utiliser pour avoir le feedback des utilisateurs lors des expérimentations afin de confirmer un effet attendu. Par exemple, après la fin d'une interaction avec un EV, nous pouvons demander aux participants leur auto-évaluation après l'expérience.

### **2.1.2 Juges externes**

Les juges externes sont des observateurs humains qui peuvent être des psychologues, des tuteurs, etc. Ces humains sont experts et évaluent les émotions et le comportement d'un utilisateur. Cette évaluation peut être en temps réel lors de son interaction avec un environnement ou bien en visionnant un enregistrement vidéo (D'Mello et al., 2008). Il existe aussi une autre étude où des juges notent chaque 20 secondes les émotions des étudiants durant leur interaction avec un jeu vidéo (Gutica et Conati, 2013).

Nous ne pouvons pas utiliser cette technique parce qu'on vise à utiliser des environnements de RV afin d'immerger l'utilisateur et cette dernière technique ne peut pas être utilisée avec le visage caché des utilisateurs. Aussi, dans notre deuxième objectif, nous avons besoin que le système reçoive les émotions en temps réel afin de pouvoir adapter les environnements virtuels.

### 2.1.3 Capteurs physiologiques

Les capteurs détectent l'état interne du corps humain comme l'activité cérébrale, la dilatation de la pupille, le rythme cardiaque, etc. Il existe plusieurs capteurs physiologiques. Nous pouvons citer le « Blood Volume Pressure » (BVP) utilisé pour mesurer la fréquence cardiaque. Cette mesure est corrélée avec la valence; le rythme cardiaque accélère plus lorsqu'une personne a une émotion positive que lorsqu'elle éprouve une émotion négative (Lang, 1995).

L'activité électrodermale de la peau reflète aussi les émotions de l'utilisateur. La réponse galvanique de la peau (GSR), également appelée conductance de la peau (SC) ou activité électrodermale (EDA) est l'un des marqueurs les plus sensibles pour la détection des émotions. L'EDA module la quantité de sécrétion de sueur des glandes sudoripares. Les changements de la conductance de la peau dans les régions de la main sont également déclenchés de manière impressionnante par la stimulation émotionnelle (Boucsein, 2012) : plus l'excitation est élevée, plus la conductance de la peau est élevée.

Outre le rythme cardiaque et les réactions galvaniques de la peau, il existe aussi une autre mesure physiologique qui est le suivi de regard. Ben Khedher et Frasson (Ben Khedher, A. & Frasson, C., 2016), ont fait une étude pour explorer la relation entre les mouvements des yeux et les performances d'apprentissage pendant les interactions avec un environnement d'apprentissage. Un autre paramètre que le suivi du regard peut fournir est le diamètre de la pupille. Kun A. L. et al ont utilisé ce paramètre pour estimer la charge cognitive des conducteurs (Kun et al., 2013).

Il existe aussi une autre mesure physiologique qui a pour but de modéliser les états mentaux de l'apprenant qui est l'activité cérébrale. L'activité cérébrale est mesurée à l'aide des capteurs cérébraux et le plus utilisé est l'EEG. Le cerveau humain est composé de milliards de neurones reliés entre eux par un nombre gigantesque de connexions synaptiques. La stimulation de ces neurones déclenche une charge électrique appelée influx nerveux qui se traduit sous forme d'onde cérébrale. La fréquence des ondes reflète l'intensité de l'activité cérébrale. Le signal EEG obtenu est calculé en hertz (Hz) et décomposé en plusieurs plages de fréquences : delta (1-4 Hz), thêta (4-8 Hz), alpha (8-12 Hz), bêta (12-25 Hz) et gamma (25-45 Hz). Chaque fréquence est

caractérisée par un ensemble de propriétés. Par exemple, les ondes de fréquence delta correspondent au sommeil. Tandis que les ondes Alpha correspondent à l'activité d'alerte et de méditation (Demos, 2005). La figure 2.1 illustre un exemple des signaux EEG décomposé sur les cinq plages de fréquences.

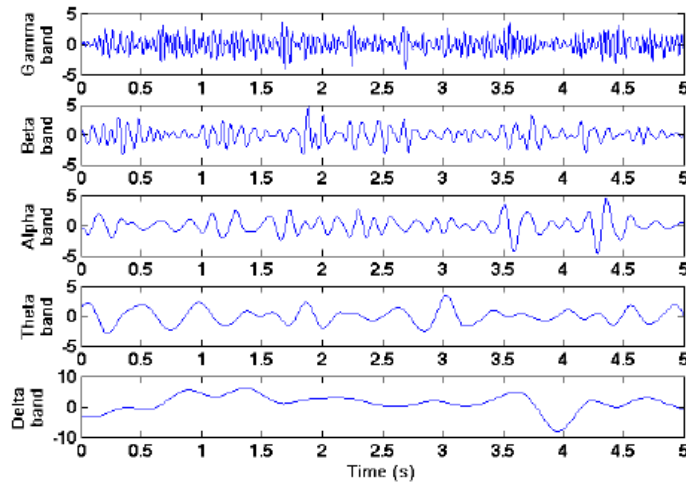


Figure 2.1 - Les cinq plages de fréquence du signal EEG (Abo-Zahhad et al., 2015)

Nous proposons d'utiliser les capteurs physiologiques afin de mesurer et suivre l'état émotionnel d'un utilisateur lors de ses interactions avec un environnement de RV. Nous proposons de créer un *Module de mesures* qui gère les différents signaux de différents capteurs physiologiques. L'objectif de ce module étant d'analyser les données reçues, les synchroniser et extraire les émotions et états cérébraux d'un utilisateur.

## 2.2 Capteurs physiologiques utilisés

Il existe plusieurs outils qui nous permettent la capture des mesures physiologiques. Nous allons utiliser ces outils pour mesurer les émotions et les états cérébraux d'un utilisateur. Nous proposons d'utiliser deux types de mesures les **EEG** et le **suivi du regard**. Dans ce qui suit nous allons présenter les capteurs que nous envisageons d'utiliser.

### 2.2.1 Casque EEG: Emotiv Epoc Plus

Emotiv Epoc Plus<sup>1</sup> est un casque EEG sans fil à 14 canaux, conçu pour la recherche et les applications avancées d'interface cérébrale informatique (BCI). L'Epoc Plus fournit un accès à des données EEG brutes de haute qualité. Il fonctionne aussi sur les appareils mobiles via la connexion Bluetooth. Le positionnement et le nombre d'électrodes varient d'un casque à un autre. Par exemple, Emotiv fournit deux types de casques, Epoc plus avec 14 électrodes et Insight avec seulement 5 électrodes. La figure 2.2 illustre le casque Epoc plus ainsi que le positionnement des 14 électrodes du casque. Le nombre élevé d'électrodes de ce casque permet de couvrir la majorité des régions du cerveau humain.



Figure 2.2 - Casque Epoc plus et positionnement des électrodes

Le SDK du casque Emotiv Epoc plus fournit les des données EEG Brut ainsi que les plages de fréquences : delta, thêta, alpha, bêta et gamma présenté dans section 2.1.3. De plus, le SDK donne accès aux cinq (5) mesures suivantes : méditation, frustration, engagement, excitation et valence. Ces indices sont calculés à travers des algorithmes internes incluses dans le SDK. Même si nous n'avons pas accès aux algorithmes propriétaires du Emotiv, un certain nombre d'études ont établi la fiabilité des indices mesurés (Aspinall et al., 2015).

---

<sup>1</sup> <https://www.emotiv.com/epoc/>

### 2.2.2 Casque EEG: Neeuro SenzeBand

Neeuro SenzeBand<sup>2</sup> (figure 2.3) est un casque à 4 canaux, conçu pour être moins intrusif que les casques EEG standard (comme celui présenté ci-dessus). Ce casque nous donne la possibilité de récupérer des données EEG brutes. Ce casque mesure les activités cérébrales à partir du lobe frontal et contrairement à Emotiv EPOC Plus, il ne couvre pas la majorité des régions du cerveau humain. Par contre le grand avantage est qu'il est beaucoup plus léger et beaucoup moins intrusif ce qui le rend plus utilisable avec les enfants lorsqu'il n'est pas nécessaire de mesurer à partir de toutes les régions du cerveau.



Figure 2.3 - Casque Neeuro Senze Band

### 2.2.3 Casque de RV avec traceur de regard intégré : FOVE

Le suivi du regard est une méthode objective pour recueillir des mesures du comportement d'un utilisateur. Cette mesure permet d'analyser l'endroit que l'utilisateur regarde. Le matériel de suivi du regard le plus utilisé est le Tobii<sup>3</sup> qui est sous la forme d'une barre horizontale qui se met sous l'écran d'un ordinateur. Nous ne pouvons pas utiliser le Tobii dans notre recherche car la majorité de nos environnements sont en RV et le visage de l'utilisateur est caché avec un casque de RV. Pour résoudre ce problème, nous proposons d'utiliser un casque de RV nommé FOVE<sup>4</sup>. Ce casque est le premier casque de RV avec suivi du regard. Il intègre des capteurs infrarouges qui peuvent suivre le regard de l'utilisateur et suivre aussi le point concentration du regard. La figure 2.4 illustre le casque FOVE.

---

<sup>2</sup> <https://www.neeuro.com/senzeband/>

<sup>3</sup> <https://www.tobii.com/product-listing/fusion/>

<sup>4</sup> <https://fove-inc.com/product/>



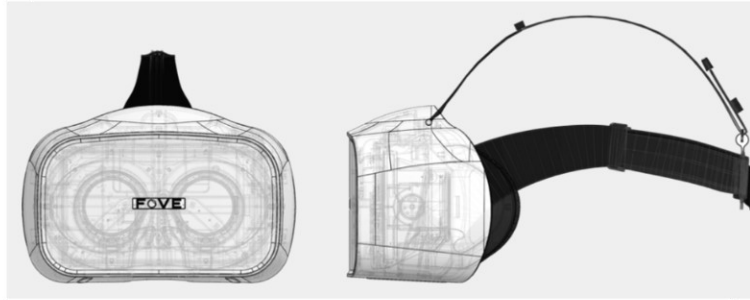


Figure 2.4 - Casque FOVE : RV + Suivi du regard

Contrairement à Tobii, FOVE ne fournit pas le diamètre de la pupille qui permet d'extraire des indices émotionnels, il fournit juste l'endroit où les yeux regardent à un instant donné. Nous proposons dans le chapitre suivant une méthode d'extraction de la tendance de l'excitation à partir des mouvements des yeux.

## 2.3 Module de mesures

Nous proposons un *Module de mesures* composé de cinq composantes globales : « Utilisateur », « Environnement de RV », « Mesures », « Traitement » et enfin « Base de données ». La figure 2.5 illustre l'architecture globale du *Module de mesures*.

- **Utilisateur** : cette composante du système est constituée par l'utilisateur que l'on installe avec les capteurs physiologiques (EEG, Traceur de regard). Son cerveau reçoit des informations à travers l'environnement RV et réagit avec des signaux qui seront mesurés par la composante « Mesures ».
- **Environnement de RV** : cette composante est ce que l'utilisateur regarde en permanence durant l'expérience. Il contient des éléments (son, musique, effet, modèle 3D, environnement complet) modifiables en temps réel.
- **Mesures** : cette composante gère la communication et la synchronisation entre les différents capteurs physiologiques. Il collecte les différentes données des différents capteurs et les transmet à la composante traitement.
- **Traitement** : cette composante analyse et traite les données des capteurs physiologiques. Les résultats des analyses et traitements sont représentés sous forme

d'indices de mesures. Cette composante gère la communication réseau (en UDP) entre ce module et les autres modules ou agents dans notre système. Elle gère aussi le stockage des mesures dans une base de données.

- **Base de données** : cette composante sert à stocker les différentes données du module. Elle stocke les données brutes des différents capteurs physiologiques, les résultats des données traitées et les informations à propos de l'environnement RV.

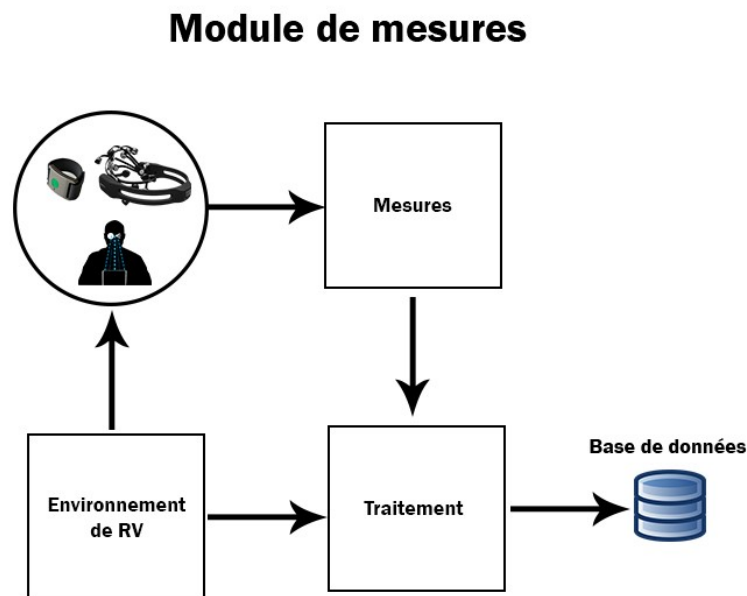


Figure 2.5 - Architecture du Module de mesures (Ben Abdessalem et Frasson, 2017) - traduite en français

## 2.4 Environnements de validation et d'expérimentation

Afin de tester notre *Module de mesures*, nous avons utilisé des environnements qui agissent sur l'état émotionnel et l'état mental des utilisateurs. Nous présentons dans ce qui suit les environnements que nous avons utilisés et avec quel capteur physiologique.

### 2.4.1 Inertia : Jeux sérieux en RV

*Inertia* est un jeu sérieux qui a pour but d'apprendre les lois de mouvements en physique. Ce jeu est basé sur le principe de la transformation de la force et de la quantité de mouvement, connue en physique de la dynamique. Par exemple, quelle force et quelle direction devrions-nous appliquer à une balle de billard pour atteindre une boule spécifique. Nous avons créé 3 types de jeux (Bowling, Pivot et Billiard) en utilisant Unity3D<sup>5</sup> qui contient un moteur de physique intégré capable de gérer une simulation de dynamique. *Inertia* a été optimisé afin de pouvoir fonctionner et réagir dans un casque mobile de RV (casque Samsung Gear VR). La figure 2.6 illustre une capture écran du jeu « *Inertia* ».



Figure 2.6 - Capture du jeu « *Inertia* »

Nous avons expérimenté notre *Module de mesures* et *Inertia* avec 30 étudiants de l'Université de Montréal. Mise à part les mesures émotionnelles et mentales, cette expérimentation vise à investiguer l'utilisation de stratégies d'intervention pour le raisonnement intuitif qui rentre dans le travail de thèse de ma collègue Ramla Ghali. Durant ces expérimentations, nous avons utilisé le casque EEG Emotiv Epop plus et nous avons réussi à mesurer en temps réel les indices de Emotiv SDK, à les intégrer dans notre *Module de mesures* et à les utiliser comme entrée dans le jeu afin d'adapter les stratégies d'intervention.

<sup>5</sup> Site de moteur du jeu Unity3D : <https://unity3d.com/fr>

Les résultats de cette étude ont été publiés sous forme d'article intitulé « *Improving Intuitive Learning Through Assistance Strategies in a Virtual Reality Game* » à la conférence *The Thirtieth Florida Artificial Intelligence Research on Society Conference (FLAIRS-30)* (Ghali, Ben Abdessalem, et Frasson, 2017).

#### **2.4.2 AmbuRun : Jeux vidéo en RV avec modification en temps réel**

*AmbuRun* est un jeu de type « infinite runner » qui consiste en une ambulance transportant une personne malade. Le joueur contrôle l'ambulance et essaye d'arriver à l'hôpital avec les moindres dégâts possibles pour sauver la personne malade. Nous avons expérimenté *AmbuRun* avec 20 étudiants de l'Université de Montréal en utilisant le casque EEG Emotiv EPOC plus et le casque de RV Fovea, qui nous rappelle, possède un traceur de regard intégré. Le but des expérimentations était de valider le bon fonctionnement des mesures EEG de notre *Module de mesures* et d'investiguer la relation entre l'excitation extraite des EEG et les mouvements des yeux. Le jeu *AmbuRun* ainsi que les expérimentations et les résultats sont détaillés dans le chapitre suivant, qui se présente sous la forme d'un article publié dans la conférence *The Thirty-Second International Florida Artificial Intelligence Research Society (FLAIRS-32)* et intitulé « *How do Players' Eye Movements Relate to their Excitement in a VR adaptive Game?* » et qui détaille notre méthodologie pour investiguer cette relation. (Ben Abdessalem et al., 2019a)

#### **2.4.3 Train Virtuel : un environnement thérapeutique en RV**

*Train Virtuel* est un environnement thérapeutique immersif en RV qui se base sur la thérapie du voyage (Biamonti et al., 2014) visant à relaxer les patients Alzheimer et réduire leurs émotions négatives. Nous avons utilisé le logiciel Unity3D qui possède un moteur de simulation physique intégré capable de simuler des aspects réels du voyage virtuel. Cet environnement, comme son nom l'indique, consiste en un train virtuel dans lequel l'utilisateur voyage virtuellement avec une famille chaleureuse assise à son côté gauche (voir figure 2.7). Le train virtuel traverse 3 environnements différents. Le premier environnement est représenté sous la forme d'une forêt avec des arbres et des animaux pacifiques. Dans le second, le train traverse un environnement enneigé avec des montagnes. Le troisième environnement est un désert ensoleillé avec un soleil chaud.



Figure 2.7 - Capture de l'environnement « Train Virtuel » (Ben Abdessalem et al., 2020)

Nous avons expérimenté *Train Virtuel* en utilisant notre *Module de mesures* avec 19 participants et, afin d'évaluer l'impact de ce train thérapeutique sur les performances mémorielles et cognitives des participants, des tâches cognitives ont été intégrées **avant et après** le voyage en train. Ces participants sont diagnostiqués avec un Déclin Cognitif Subjectif (DCS) qui est considéré comme un état précoce de la maladie d'Alzheimer (Slot et al., 2019). Nous avons utilisé le casque EEG Emotiv Eloc plus et le casque de RV FOVE pour cette expérience. Les résultats montrent que nous pouvons suivre les émotions des participants et que le *Train Virtuel* est capable de réduire les émotions négatives comme la frustration. Les résultats montrent aussi une nette augmentation des performances de mémorisation et dans certains cas une amélioration des capacités cognitives, en particulier avec les exercices d'attention. Un questionnaire d'auto-évaluation post-expérience confirme l'intérêt des patients pour cette méthode et la diminution de leur stress après le voyage immersif (73.7% des participants ont confirmé que le Train Virtuel est relaxant). Ils ont aussi confirmé leur appréciation de la RV et son effet d'immersion.

Les détails et résultats de cette expériences ont été publiés dans la conférence *9th International Conference on Sensor Networks (SENSORNETS2020)* sous forme d'un article intitulé « *Application of Virtual Travel for Alzheimer's Disease* » (Ben Abdessalem et al., 2020).

## 2.4.4 NetMath : une plateforme d'apprentissage des mathématiques

*NetMath*<sup>6</sup> est une plateforme web d'apprentissage des mathématiques pour les élèves du primaire et secondaire. Cette plateforme contient un ensemble de tâches et d'exercices sur différents sujets de mathématiques tels que les probabilités, statistiques, nombres décimaux, fractions, etc. En utilisant cette application, nous avons réalisé une expérimentation qui vise à détecter les élèves surdoués avec 17 élèves de 4ème et 5ème année primaire de l'école Samuel de Champlain à Brossard. Afin de détecter les élèves surdoués, ils ont essayé de résoudre des exercices de 6ème année secondaire en utilisant *NetMath*. La figure 2.8 illustre un exemple des exercices réalisés.



Figure 2.8 - Exemple d'un exercice de mathématiques difficile de *NetMath* (Ghali et al., 2018)

En faisant les exercices, nous avons mesuré leur attention et leur charge mentale en utilisant le casque EEG Neeuro SenzeBand (Figure 2.3). L'avantage de ce casque EEG est qu'il est beaucoup moins intrusif et qu'on peut l'utiliser avec les enfants sans générer des émotions négatives.

<sup>6</sup> <https://www.netmath.ca/fr-qc/>

Le SDK ce casque fournit 4 **états mentaux**: l'attention, concentration, la charge mentale, et la relaxation, par contre le SDK fonctionne juste avec des appareils mobiles intelligentes et non pas directement avec l'ordinateur. Nous avons donc créé une application mobile capable de communiquer avec le casque via Bluetooth. Cette application envoie les données EEG à l'ordinateur par la suite en utilisant le réseau Wifi. Nous pouvons utiliser ces résultats directement dans le *Module de mesures* et plus spécifiquement dans la composante « Traitement » ou bien les enregistrer dans un fichier CSV. La figure 2.9 illustre le processus d'acquisition de données à partir du casque Neeuro SenzeBand.

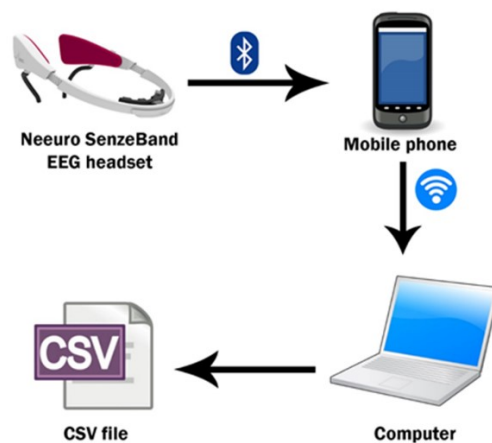


Figure 2.9 - EEG acquisition process (Ghali et al., 2018)

Les résultats des expérimentations montrent que les mesures en temps réel fonctionnent en utilisant le casque Neeuro SenzeBand. Les détails et résultats de cette expérience ont été publiés dans le journal *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications (JILSA)* sous forme d'un article intitulé « *Identifying Brain Characteristics of Bright Students* » (Ghali, Ben Abdesslem, et al., 2018). Nous précisons que notre contribution dans ce travail se limite à la création de l'outil de mesures avec le casque EEG Neeuro SenzeBand, la participation aux expériences et une partie de la rédaction qui concerne les mesures et les expérimentations.





## Chapitre 3 - Relation entre le mouvement des yeux et l'excitation dans un jeu de RV adaptatif

Dans ce chapitre, nous présentons une étude exploratoire pour investiguer la relation entre les mouvements des yeux et l'excitation extraite à partir d'un casque EEG lors de l'interaction avec un jeu vidéo en RV. En effet, l'interaction avec les jeux vidéo provoque des réactions émotionnelles. Ces réactions pouvant affecter les performances du joueur et son expérience de jeu (game experience en anglais), il est donc intéressant de suivre et d'analyser ses émotions. De plus, l'utilisation de la RV permet l'isolation du joueur du monde extérieur et de toute distraction et procure ainsi, une expérience plus riche et plus intéressante que celle offerte par l'interaction avec un environnement en 2D.

Dans ce sens cette étude vise à évaluer l'efficacité de l'utilisation du casque FOVE qui, nous rappelons, est équipé d'un module de suivi du regard intégré pour la détection de l'excitation à partir des mouvements des yeux. Ceci nous permettra d'utiliser seulement le casque FOVE afin d'adapter des jeux vidéo.

Les hypothèses de cette étude sont les suivantes :

- Il existe une corrélation entre l'excitation extraite à partir du EEG et le suivi du regard dans les jeux vidéo.
- Il existe une possibilité d'adapter un jeu vidéo en utilisant seulement le suivi du regard.

Pour répondre aux deux objectifs de cette étude nous avons créé un système d'adaptation de jeu composé de 3 parties ; le *Module de mesures*, le jeu *AmbuRun* en RV et un

*Agent Neural* qui sera détaillé davantage dans la deuxième partie de ce document. Dans le jeu *AmbuRun*, le joueur conduit une ambulance transportant une personne ayant besoin de soins d'urgence. Le joueur doit contrôler le mouvement de l'ambulance, par le biais d'une manette, en évitant les autres véhicules et essayer d'arriver à l'hôpital avec les moindres dégâts possibles.

Ce jeu est cette fois-ci un environnement de RV permettant la modification de ses paramètres en temps réel. Nous changeons la difficulté en augmentant et en diminuant la fréquence des véhicules obstacles et nous modifions la vitesse du jeu en augmentant et en diminuant la vitesse de l'ambulance. L'*Agent Neural* se charge de ces modifications suivant l'indice d'excitation et de frustration mesuré et envoyé par le *Module de mesures*. Nous rappelons que Le *Module de mesures* détaillé dans le chapitre précédent, se charge de l'extraction des émotions et états cérébraux/mentaux et plus précisément de l'excitation.

Le casque FOVE de RV utilisé dans cette étude permet seulement l'extraction de la position des yeux dans l'espace tridimensionnel. Nous avons alors développé un algorithme qui calcule des métriques plus significatives telle que la *distance spatiale euclidienne tridimensionnelle* entre deux positions d'un œil sur une période de temps T dans le but d'investiguer la relation entre celle-ci et la frustration.

Une étude expérimentale a été réalisée avec 20 participants. Les participants étaient équipés des casques Emotiv EPOC + et Fove VR. Deux types de données ont été simultanément extraites et enregistrées; à savoir les données EEG utilisées pour l'adaptation du jeu en temps réel et le mouvement des yeux utilisé pour le traitement et l'analyse hors ligne.

Le reste de ce chapitre est constitué de l'article intitulé « *How do Players' Eye Movements Relate to their Excitement in a VR adaptive Game?* » publié dans la conférence « *The Thirty-Second International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference* » en 2019. Ma contribution essentielle consiste à la création du jeu vidéo « *AmbuRun* », Expérimentation, analyse des résultats et écriture de l'article. Marwa Boukadida et Maher Chaouachi ont contribué avec leurs conseils, leurs corrections et à la rédaction. L'article a été révisé, corrigé et financé par mon directeur de recherche Claude Frasson.

# How do Players' Eye Movements Relate to their Excitement in a VR adaptive Game?

Hamdi Ben Abdesslem, Maher Chaouachi, Marwa Boukadida and Claude Frasson

Published in: The Thirty-Second International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference (FLAIRS-32), Florida, USA, May 19-22 2019, 270-275

Lien: <https://www.aaai.org/ocs/index.php/FLAIRS/FLAIRS19/paper/view/18222/17340>

## Abstract

Interaction with games can induce emotional reactions which could have an impact on players' game experience and performance. Physiological sensors such as EEG and eye tracking represent an important mean to track these emotional reactions. In addition, virtual reality isolates the players from the external environment, strengthening the emotional measures. In this paper, we present an explorative study of the use of eye tracking for game adaptation according to the players' excitement. Results showed that there exists a relationship between the modification of the game's speed and the EEG excitement index and a correlation between eye movement and excitement as well. These results suggest that eye tracking could be a valid support or replacement of EEG data in game adaptation.

### 3.1 Introduction

Recent years have witnessed an increasing interest in de-signing adaptive and player-centric strategies within video games research studies (Frommel et al., 2018). This trend has been highlighted with the ongoing advances in Artificial Intelligence and more specifically in the field of affective computing (Brigham, 2017). One of the main challenges of these studies is to create sensing mechanisms able to infer, monitor and analyze the players' affective states, and to provide the adapted interaction in order to improve their game experience. The advent of Virtual Reality (VR) started a big shift in the current game adaptation frameworks. Despite the VR impact on the players' immersive experience, this technology significantly limits the ability to sense the players' affective states compared to traditional assessment systems as the player's face is completely hidden by the VR headset. For instance, commonly used emotion detection methods using facial ex-pressions, traditional eye tracking devices or external judges are not compatible with VR.

In this paper we propose a novel approach in analyzing the players' states using two main sensing techniques, namely electro-encephalography (EEG) and a VR Headset with a built-in eye tracking. We will use EEG data as real-time source of players' excitement analysis as well as the main criteria of game adaptation. Eye tracking data will be, conversely, used in our offline analysis of players' excitement.

Frequently mixed up in the literature with arousal or emotional intensity, players' excitement represents a key factor in their overall game experience. Excitement is de-fined as the anticipation of a positively appraised energy-based event (Ganjoo, 2005). It is also defined as a positive emotional state that consists of a high level of pleasure and arousal (Dursun et al., 2010). Detecting and optimizing players' excitement could be highly beneficial in VR games. Therefore, the focus in this paper is to assess the efficiency using a built-in eye tracking VR headset to analyze players' excitement in an adaptive VR game environment. In particular, our hypotheses are the following; H1: is there a correlation between excitement and eye tracking in video games? And H2: Is there a possibility to adapt a game using only eye tracking?

The rest of this paper is organized as follows. In Section 3.2, we give an overview of the related works. In Section 3.3 we describe AmbuRun VR game. In Section 3.4, we present our adaptation approach and the physiological sensors that we use. In Section 3.5 we detail the experiment procedure, and finally, in Section 3.6 we present the obtained results.

## **3.2 Related Works**

### **3.2.1 Game Adaptation**

Game experience is considered as the most important part, in designing games. In fact, it is considered to be of key importance for creating captivating and entertaining games (Chanel et al., 2011; Frommel et al., 2018).

Research has shown that adjusting dynamically the difficulty in video games improves the game experience. However, it can be difficult to find out when adjustments and adaptation are necessary. In their study Frommel et al. (Frommel et al., 2018) proposed an approach of emotion based dynamic difficulty adjustment that uses self-reported emotions to inform when an adaptation is necessary. In order to test their approach, they conducted a study with 66 participants so as to explore performance and effects on player experience. The results show that their approach, which consists of adapting difficulty according to emotions, provided a better player experience than other approaches which consist of adjusting dynamically the difficulty.

In the same vein, Ben Abdesslem et al. (Ben Abdesslem et al., 2018b), proposed a neurofeedback approach in adapting a VR game, in order to improve the users' game experience. They intervened on the VR game, assessed the impact of the different interventions, and adapted the game using adaptation strategy according to the player's affective state. They used an adaptation strategy that focused not only on the game parameters but also the player's affective states. They evaluated this approach by conducting an experimental study involving 20 participants. The results showed that the adaptation of the game, directed by the user's emotional reactions, optimized their frustration and excitement in the game.

Moreover, Chanel et al. (Chanel et al., 2011) proposed to maintain player's engagement by adapting games difficulty according to player's emotions. They analyzed self-reports and

physiological data and found that playing the Tetris game at different levels of difficulty provoked different emotional states. The results obtained from their study demonstrate the importance of adapting the game difficulty according to the emotions of the player in order to maintain his engagement.

### **3.2.2 Eye tracking and EEG**

Most studies in brain assessment and emotions detection fields have used EEG signals and eye tracking to detect and assess emotions and mental states. Several researches are based on EEG signals in order to recognize the user's emotions and mental states. Horlings and his colleagues (Horlings et al., 2008) conducted a study using IAPS (International Affective Picture System) on students. They showed them different images that provoke some emotions and, in parallel, measured their mental activity with EEG. Results showed that EEG allows the recognition and classification of users' emotions.

Some other researchers used EEG data in the detection of emotions for improving learning. Chaouachi et al. (Chaouachi et al., 2015b) integrated two mental state indexes extracted from EEG which are engagement and workload in their system called Mentor. This system used different rules in order to maintain students in a positive mental state while learning (Chaouachi et al., 2015a). D'Mello et al. (D'Mello et al., 2012) used eye tracking data to detect boredom and disengagement in an intelligent tutoring system that uses a commercial eye tracker. The system reorients the attentional patterns of the students when he detects their disengagement or boredom during the activity.

### **3.2.3 Virtual Reality Games**

Due to its remarkable progress in recent years, virtual reality started to be used in many fields. In fact, this technology has a lot of advantages and the major one is immersion. VR tricks the mind of the user and increases his sense of presence in the virtual environment, so that he thinks that he is really inside this environment. VR makes the user believe that he is in a real world and promotes his performance in games (Biocca, 2006). Therefore, VR is being increasingly seen as the most interesting way to present a video game to players.

In the field of serious games, (Ghali et al., 2017), de-signed a VR game to teach some basic physics rules. In fact, VR offered an environment in which the user can deploy intuitive reasoning and acquire knowledge faster than usual academic training. They assessed users' emotional behavior and changed assistance strategies in real-time according to player's levels of engagement and frustration in order to improve their intuitive reasoning.

Moreover, Pedraza-Hueso et al. (Pedraza-Hueso et al., 2015) introduced the development of a VR system based on a serious game in order to allow users to carry out physical and cognitive rehabilitation therapies using an inter-face based on Microsoft© Kinect. Their VR game consists of different types of exercises by which the user can train and rehabilitate several aspects such as cognitive capacities.

In this research, we will use VR in order to create an adaptable immersive game according to EEG and eye tracking signals.

### **3.3 AmbuRun VR Game**

We started by creating AmbuRun VR game. This game is about an ambulance carrying a sick person. The player takes control of the ambulance and tries to arrive safely at the hospital without damage in order to save the sick per-son. The player should dodge the cars, buses, and tracks on the road to arrive without harm (Ben Abdessalem et al., 2018b).

In this game, as shown in Figure 3.1, the user interface has three main areas, top left, top middle and top right. In the top left of the scene, the player can see the health bar of the sick person so he can monitor the person's health while driving. In the top middle of the scene, the number of attempts to arrive at the hospital. In the top right areas, the player can see the number of kilometers traveled.

As we mentioned, the player should dodge cars, buses and trucks. The difference between the cars and bus-es/trucks in the game play is that, if the player hits a bus or a truck (a big obstacle), the sick person will instantly die and he must try again, but if the player hits a car, the health of the sick person will just decrease and he will not die instantly but only after multiple car hits. Figure 3.1 illustrates a screen capture of the game.



Figure 3.1 - Screen Capture of AmbuRun VR Game

In order to achieve our goal, AmbuRun should be adaptable and support the modification of its parameters and for that, we created this game in a way to support dynamic modification remotely from a neural agent which will be described in the next section. The possible modifications of the game are the modification of the speed and the modification of the difficulty. We change the difficulty of the game by increasing and decreasing the frequency of the obstacles. If the player encounters few cars and buses, the game will be easy, and if he cruises too many cars, the game will become hard. We change the speed of the game by increasing and decreasing the speed of the ambulance.

In the next section, we will present our game adaptation approach and the different physiological sensors we will use.

### **3.4 Game Adaptation Approach and Physiological Measurement**

In order to achieve our goals, we started by creating a game adaptation system which uses sensing technologies. We will start by presenting the sensing technologies that we will use in our approach.



### 3.4.1 Game Adaptation System

This system is composed of three main parts; the first one is the AmbuRun VR game presented in the previous section, the second one is a measuring module and the third one is the neural agent.

#### 3.4.1.1 Measuring Module

The role of the measuring module in our system is to detect the different mental states and emotions. It receives the different signals from measuring tools (for instance EEG, Eye tracking, etc.), synchronizes, analyses them, then extracts emotions and mental states. Figure 3.2 illustrates a screen capture of the measuring module; the top five gauges are: meditation, frustration, engagement, excitement and valence, the bottom five gauges are the average band power (theta, alpha, low beta, high beta, gamma) and the two middle gauges are stress and long term stress.



Figure 3.2 - Screen Capture of the Measuring Module

The module sends the emotions and cerebral states to the neural agent and stores these data in a local data base. In this paper we connected EEG as a measuring tool.

### 3.4.1.2 Neural Agent

The neural agent (Ben Abdesslem et Frasson, 2017) is an intelligent agent that was designed in order to perform two main functions: the first consists of receiving relevant information about the player's emotional state from the measuring module. The agent analyzes this information and decides of the best intervention/modification to be performed on the game in order to reach a desired emotional level. The second involves observing whether the intervention reached its expected outcomes on the player's emotional state.

## 3.4.2 Physiological Measurement

To measure the player's excitement, our approach is based on using a sensor-based technique with two physiological data channels, namely, EEG and eye tracking. These two physiological data were connected to the measuring module with two different objectives: (1) EEG data was used to feed the system with real-time information about the player's excitement for real-time game adaptation purpose; (2) Eye tracking data was recorded for offline post-experimentation processing.

### 3.4.2.1 EEG Measures

In this study, we used Emotiv Epoc+ EEG headset technology to track the excitement of the player. The headset contains 14 electrodes spatially organized according to International 10-20 system, moist with a saline solution. The electrodes are placed at antero-frontal (AF3, AF4, F3, F4, F7, F8), fronto-central (FC5, FC6), parietal (P7, P8), temporal (T7, T8) and occipital (O1, O2) regions with two additional reference sensors placed behind the ears (CMS, DRL). The detailed position of the measured regions is shown in figure 3.3.

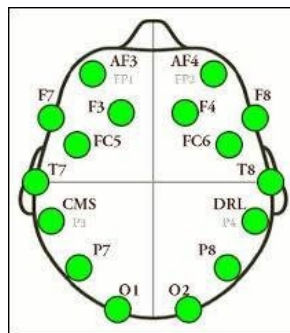


Figure 3.3 - Emotiv Headset Sensors Placement

Emotiv system generates raw EEG data in ( $\mu\text{V}$ ) with 128Hz sampling rate as well as the five well-known frequency bands, namely Theta (4 to 8 Hz) Alpha (8 to 12Hz), low Beta (12 to 16 Hz), high Beta (16 to 25 Hz) and gamma (25 to 45 Hz). Furthermore, the system uses internal algorithms to measure the following mental states: mediation, frustration, engagement, excitement and valence. Even though we don't have access to the system proprietary algorithms to infer these mental states from the raw data and the frequency bands, a number of studies have established the reliability of the output (Aspinall et al., 2015).

### 3.4.2.2 Eye Tracking Measurement in VR

Eye tracking data was collected using a built-in eye-tracking module inside the VR headset. The device uses a 5.7 inch display with a WQHD (2560x1440) resolution, 100 degrees as a field of view and 70 fps (frame per seconds) frame rate. The eye-tracking module is composed of 2 infrared eye tracking system (one for each eye) and has 120 fps frame rate with a tracking accuracy less than 1 degree. Fove VR headset provides software in which we can monitor the movement of eyes in real-time. Figure 3.4 illustrates a screen capture of Fove software interface.

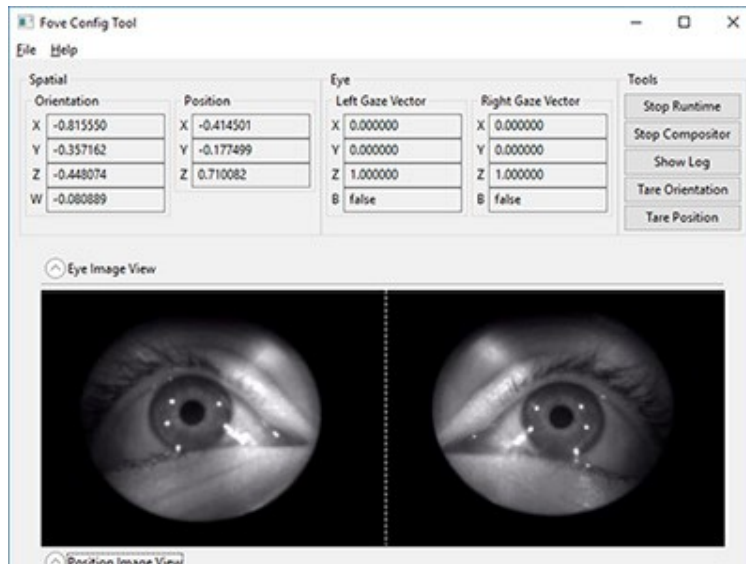


Figure 3.4 - Screen Capture of Fove Interface

Since Fove software output only provides eye position in the three-dimensional space, a post-processing algorithm was developed in order to compute more meaningful metrics such as the

eye distance and the fixation period. We used the Equation 1 to calculate the sum of the three-dimensional Euclidean space distance between two eye tracking position over a T time period.

$$\sum_{k=2}^T \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2 + (z_k - z_{k-1})^2}$$

Equation 1 - Sum of three-dimensional Euclidean distance for T time period

### 3.5 Experiment

We experimented our approach on 20 participants (10 females), with a mean age = 31.05 (SD = 4.96). Before taking part of the experiment, each player signed a con-sent form in which the goal of the study and the different steps of the experiment were clearly explained. Then, the player was equipped with the Emotiv Epoc+ and Fove VR headset devices described in the previous section. Once the player feels comfortable with the setup and ready to start, the measuring module, the neural agent as well as the AmbuRun VR game were simultaneously launched and the player starts interacting with the game using a wireless gamepad. Earphones connected to the device were used in order to isolate the player from the ambient environment and to intensify his level of immersion in the VR game. Figure 3.5 illustrates the experimental process. Two data sources were simultaneously extracted and recorded:

- EEG data used for online game adaptation.
- Eye movement used for offline processing and analysis.

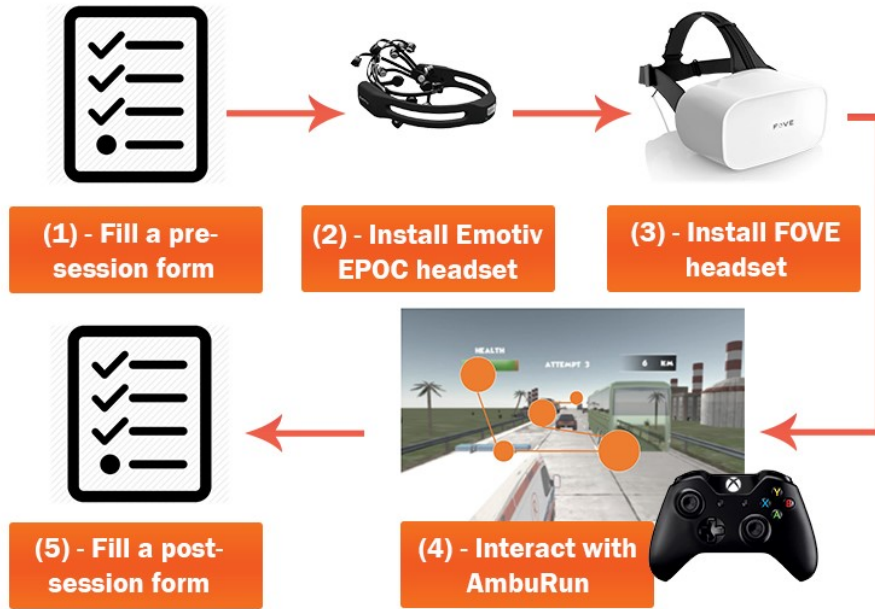


Figure 3.5 - Process of the Experiment

During the experiment, the measuring module continuously tracks the excitement values of the player. The neural agent computes at a periodic time interval of 20 seconds the mean level of excitement and adapts accordingly the speed of the game.

To sum up the following loop: AmbuRun → Measuring module → Excitement level → Neural agent → Game speed → AmbuRun was used in order to adapt the game for all the participants.

After finishing the game session, each participant was asked to fill in a post-session questionnaire in which he provided his subjective feedback about the whole experience (for instance his opinion about using VR). The goal of this questionnaire was to help us improve our future re-search methodology.

### 3.6 Results and Discussion

The first objective of this research was to discover if there is a relationship between eye movement and the adaptation performed on the game to regulate the players' excitement level. To this end, we started by analyzing the mean total distance performed by each player's eyes 20 sec before and after the game adaptation. The results showed that except for participants 1, 13

and 15, 85% of the subjects showed an increase in their mean eye movement distance 20 seconds after the game modification was performed. The detailed results for all the participants are shown in figure 3.6.

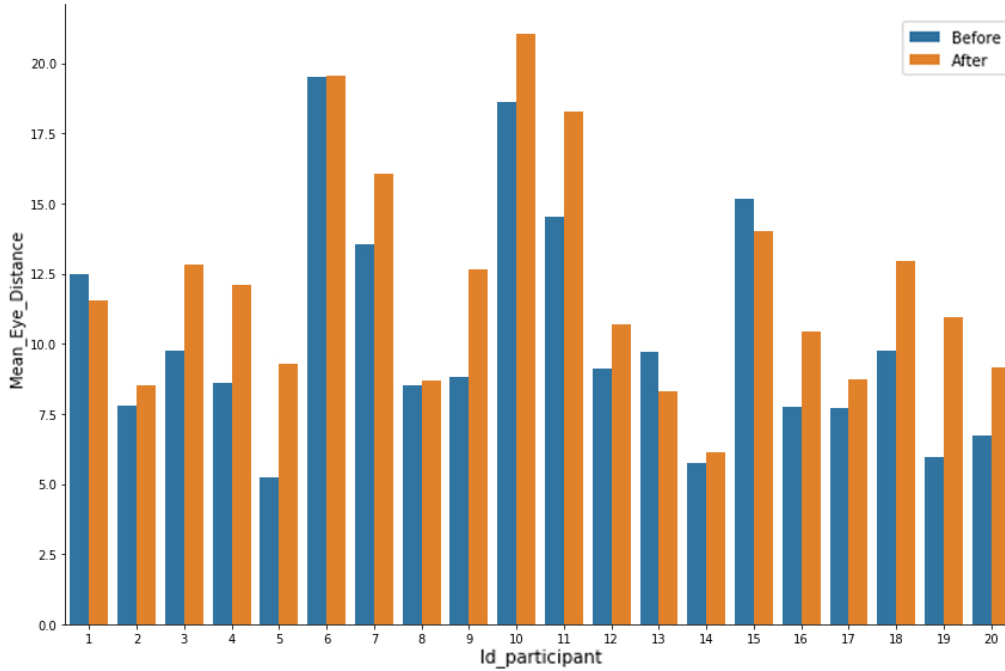


Figure 3.6 - Histogram of Mean Eyes Distance Before and After Adapting the Game

The averaged analysis across all the participants showed also an increase of 16 % in the eye movement distance with an average distance of 10.52 before intervention and 12.22 post intervention.

In order to confirm this interplay between the neural agent adaptive interventions in the game to regulate the players’ excitement and their eye movement patterns, we also conducted a repeated measure ANOVA with the general mean eyes distance before and after the agent intervention as dependent variable. Results show that there was a significant impact of the agent intervention on the participants’ eye movement ( $p=0.004$  and  $F=8.23732$ ). Table 3.1 details the obtained results.

Table 3.1 - ANOVA Eye distance

	Eye Distance Before	Eye Distance After
Mean	10.5216	12.2227
SD	5.9772	6.4467
N	220	200
F	8.23732	
P	0.004	

Likewise, the analysis of the players' excitement level measured via EEG data showed also the same positive increase trend in the average EEG excitement data 20 seconds after the neural agent modification of the game. More precisely a repeated measure ANOVA test with players' excitement level as dependent variable revealed a significant increase of post agent intervention ( $p=0.000168$  and  $F=14.660$ ). Table 3.2 details the results and shows that when the agent makes the game faster, the mean excitement increase from 0.437 to 0.489 (5.2% more).

Table 3.2 - ANOVA excitement (More detailed study of this result could be found in (Ben Abdessalem et al., 2018b))

	Excitement Before	Excitement After
Mean	0.437	0.489
SD	0.214	0.203
N	220	200
F	14.660	
P	0.0001	

This overall trend obtained in our first analysis lead to our second research question, which is: to what extent the eye movement and the excitement level measured by the EEG data are correlated? In order to have a more fine-grained analysis at the intervention level (N=220

interventions in total across all the participants), a Pearson correlation test between the eye movement difference (before and after the intervention) and the mean excitement (before and after the agent intervention to increase the speed) was conducted. The results showed a significant fair correlation of 0.58 between these two measures ( $p < 0.0001$ ).

The detailed correlation for these two measures made for each participant confirmed also the existence of this relationship. In fact, the correlation between EEG excitement data and eye movement ranged from 0.04 (lowest correlation value for a subject) to 0.906 (highest correlation value for a subject). Figure 3.7 shows a boxplot of all the correlations made for all the participants in which the median correlation is 0.6.

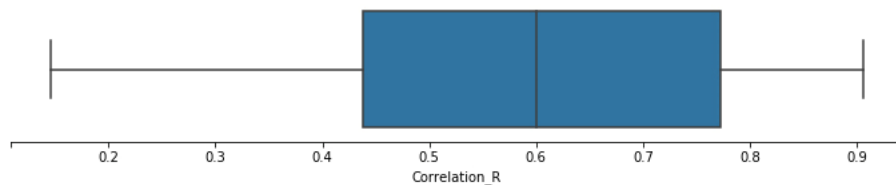


Figure 3.7 - Boxplot of R Score Correlation for all the Participants

The combination of our results could be summarized as follows: (1) the increase of the game's speed generates more excitement, (2) the increase of the speed of the game makes the eyes move more, and, (3) if the excitement increase, the eyes move more.

In the light of these findings, we can intuitively state that the use of eye movement as an indicator of players' excitement level could be an interesting substitute or reinforcement of EEG to intelligently adapt the game parameters.

We believe that eye tracking could be a very rich data source for adaptive strategies in VR games especially since they could be integrated in the VR device and they could be considerably less intrusive than EEG solutions. Nevertheless, we also believe that despite these promising results, a deeper analysis of the eye movement behavior integrating other player's eye patterns such as fixation, blink rates and saccades supported with machine learning could drastically enhance the accuracy of the excitement estimates. For example, in our study, three participants did not show an increase on their eye movement following the agent intervention. This could be



attributed to several factors such as the players' characteristics or the insensitivity to the nature of the intervention itself. Therefore, Artificial Intelligence reinforcement techniques combined with other metrics could be beneficial to overcome these challenges.

### **3.7 Conclusion**

In this paper, we presented an explorative empirical study of the use of eye tracking as indicator of players' excitement level. An experiment involving 20 participants was performed during which they interacted with an adaptive VR game designed to adapt according to their EEG excitement data. Results showed that (1) there exists a significant relationship between the modification of the game's speed parameter and the eye tracking movement; and (2) the existence of a correlation between the EEG excitement data and the players' eye movement patterns. These results established that eye tracking could be an interesting data source for VR adaptive games. In our future work we aim to build a machine learning model able to detect players' excitement and to suitably adapt the game parameters using only eye tracking data.

### **Acknowledgments**

We acknowledge NSERC-CRD and Beam Me Up for funding this work.



## **Partie II : Contrôle et amélioration de l'état cognitif**



## Chapitre 4 - Contrôle et Amélioration de l'état émotionnel et mental des utilisateurs à travers l'adaptation des EVs

Afin de répondre à notre deuxième objectif qui est l'amélioration de l'état cognitif des utilisateurs, nous proposons d'adapter les EVs. Comme les adaptations apportées aux EVs auront un impact différent selon l'état émotionnel et mental qui précède cette adaptation, nous proposons d'utiliser le *Module de mesures* présenté dans la partie précédente afin de suivre l'état émotionnel et mental des utilisateurs, et en tenant compte de ces états, intervenir dans l'EV dans le but d'améliorer leurs états cognitifs. Après chaque adaptation, il faut percevoir les réactions émotionnelles et intervenir de nouveau selon ces réactions, ce qui crée une boucle (émotion → intervention sur EV → émotion). Nous proposons d'utiliser des agents intelligents afin d'automatiser ces interventions pour qu'elles s'exécutent sans interruption en temps réel car l'une des spécificités des agents intelligents est qu'ils sont autonomes.

### 4.1 Agents Intelligents

Par définition, un agent intelligent est une entité virtuelle autonome, capable d'agir dans un environnement et d'atteindre ses objectifs en prenant en considération ses ressources et ses capacités et en communiquant avec les autres agents (Ferber et Perrot, 1995). Un agent intelligent est doté de trois caractéristiques importantes :

- **Autonomie** : un agent est indépendant de l'utilisateur et des autres agents et il peut prendre des initiatives et agir dans son environnement en tenant compte de ses buts, ses ressources et ses compétences.

- **La capacité de Communication** : un agent intelligent est capable de communiquer avec les autres agents pour échanger de l'information et pour trouver des solutions à des problèmes plus ou moins complexes.
- **La capacité d'agir** : un agent intelligent est parfois capable de s'adapter, de raisonner et d'agir dans son environnement. Les actions de l'agent intelligent peuvent l'aider à apprendre, influencer les autres agents et changer son environnement.

Dans le domaine des jeux vidéo la notion d'agent intelligent est souvent présente et liée à la technologie d'IA qui vise à réaliser un comportement plus réaliste pour des joueurs non humains (robots) dans les jeux et bien plus compétitifs pour les joueurs humains (Guillaume Asselin, 2013). L'utilisation des agents intelligents existe aussi au niveau des jeux sérieux. En effet, avec les agents intelligents, les jeux sérieux peuvent couvrir des scénarios plus complexes (Van Krevelen D.W. F., 2009)

Il existe diverses manières de concevoir un agent intelligent et cela dépend généralement de la complexité de ce dernier et du but de l'application. Cependant, un agent intelligent est toujours défini comme étant une entité intelligente qui perçoit l'environnement qui l'entoure à travers ses capteurs et agit sur ce dernier via ses effecteurs (Russell et Norvig, 1995) (voir figure 4.1).

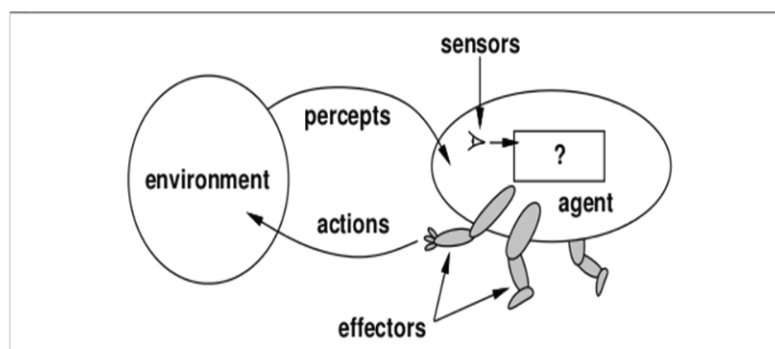


Figure 4.1 - L'interaction d'agent intelligent avec son environnement (Russell et Norvig, 1995)

Il existe différents types d'agents intelligents selon la manière de perception et de raisonnement avec l'environnement, son architecture et sa façon d'interagir avec les différents éléments de son

environnement pour atteindre ses buts. Ce qui suit est une description des principaux types d'agents intelligents.

#### **4.1.1 Agent réactif**

Les agents à capacités réactives n'ont pas de représentation explicite de leurs environnements. Ces agents fonctionnent selon un modèle stimuli/réponse, c'est à dire qu'ils ne planifient pas les actions, mais ils réagissent de manière rapide selon les perceptions des situations qui se présentent en utilisant des règles prédéfinies du type « si condition alors action ».

#### **4.1.2 Agent cognitif**

Un agent cognitif est capable d'accomplir des tâches complexes indépendamment des autres agents, et peut ainsi résoudre des problèmes compliqués. Parmi les agents les plus utilisés dans cette catégorie on trouve l'agent BDI (Belief-Desire-Intention) qui réagit dans son environnement selon les trois critères (Rao & Georgeff, 1995) suivants :

- Les croyances (Belief) : les informations que l'agent possède sur son environnement et sur les autres agents.
- Les désirs (Desire) : les objectifs que l'agent souhaite atteindre.
- Les intentions (Intention) : les plans et les actions que l'agent décide de suivre pour accomplir ses désirs en utilisant ses ressources.

En général, un agent BDI doit être au courant de l'évolution de son environnement. Selon ces changements l'agent doit choisir ses désirs et déterminer ses intentions et les actions adéquates pour accomplir ses objectifs en utilisant ses ressources.

#### **4.1.3 Agent hybride**

Les agents hybrides sont dotés de capacités cognitives et réactives. En effet ils sont capables de raisonner, de planifier ainsi que de collaborer avec d'autres agents pour réaliser leurs actions et atteindre leurs buts d'une manière rapide et sophistiquée.

Nous proposons de construire un agent hybride, que nous appelons *Agent Neural*, pour modifier les EVs, suivre les réactions émotionnelles, et déclencher une nouvelle modification.

## 4.2 Agent Neural

Notre agent intelligent est appelé *Agent Neural* par ce qu'il opère en utilisant un type spécifique de biofeedback qui est le neurofeedback. Dans ce qui suit, nous présentons une brève description du biofeedback et du neurofeedback et par la suite nous présentons les fonctionnalités de l'*Agent Neural*.

### 4.2.1 Biofeedback et Neurofeedback

Le biofeedback consiste à mesurer une activité physiologique, en utilisant un ensemble de capteurs physiologiques, et présenter en temps réel une rétroaction (en anglais : feedback) visuelle ou auditive à l'utilisateur (Sherlin et al., 2011). Cette rétroaction du signal biologique améliore la prise de conscience de l'individu et lui permet, suite à un entraînement de se servir de ces informations afin de contrôler des fonctions de son système physiologique (Moss, 2002). La figure 4.2 illustre le principe du biofeedback.

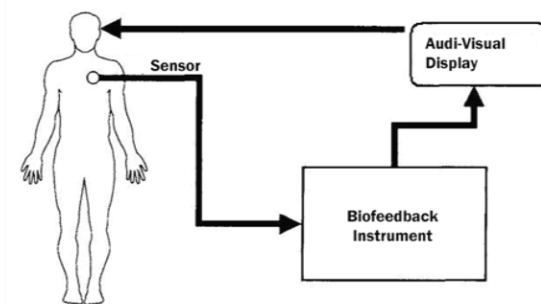


Figure 4.2 - Système biofeedback basique (Moss, 2002)

Le neurofeedback est un type de biofeedback qui mesure les ondes cérébrales pour produire un signal qui peut être utilisé comme rétroaction. Lorsque l'activité mesurée est une activité cérébrale, le biofeedback s'appelle neurofeedback (Sherlin et al., 2011). Le neurofeedback peut être utilisé pour permettre aux personnes d'apprendre à gérer des aspects spécifiques de leur activité neuronale à travers une interface cerveau-ordinateur (Van Doren et al., 2017). Par



exemple, le neurofeedback peut être utilisé pour traiter les troubles du déficit de l'attention (Duric et al., 2014)

Pour notre sujet de recherche, l'*Agent Neural* utilise le neurofeedback pour suivre et changer l'état émotionnel et mental de l'utilisateur.

#### 4.2.2 Fonctionnalités de l'Agent Neural

Nous proposons un *Agent Neural* capable de suivre l'état émotionnel d'un utilisateur en utilisant le *Module de mesures* et d'intervenir dans les EVs. L'*Agent Neural* modifie les EVs en tenant compte de l'état émotionnel et mental de l'utilisateur, par conséquent l'intervention à un instant  $t$  dépend de la variation (augmentation ou diminution) des émotions et état mentaux qui précède cet instant et a pour but de les améliorer. Les améliorations sont relatives à chaque environnement, par exemple lors d'un jeu vidéo l'amélioration consiste à provoquer plus d'intérêt ou de motivation chez les joueurs tandis que lors d'un environnement thérapeutique, l'amélioration consiste à relaxer les patients. Pour cette raison, l'*Agent Neural* utilise une base de règles d'intervention spécifique à l'environnement de l'application. Les conditions de déclenchement, les actions et le but des règles d'interventions changent selon chaque environnement. Nous détaillons l'architecture de l'*Agent Neural* et ses composantes dans les chapitres 5 et 6. et particulièrement en 5.4.3.

L'*Agent Neural* est un agent de type hybride parce qu'il est capable de **raisonner** en suivant l'état émotionnel et mental des utilisateurs, de **planifier** ses interventions selon ces états en utilisant une base de règles et de **collaborer** avec d'autres agents, modules, ou systèmes en communiquant avec ces derniers et en partageant ces ressources (base de décisions et base de règles). Le **but** de l'*Agent Neural* dépend de l'environnement ou système avec lequel il interagit.

### 4.3 Environnements de validation et expérimentations

Afin de tester notre *Agent Neural*, nous avons utilisé plusieurs EVs qui agissent en temps réel sur l'état émotionnel et mental des utilisateurs pour les améliorer. Nous présentons dans ce qui suit les études que nous avons réalisées avec les environnements que nous avons utilisés.

### 4.3.1 AmbuRun: Jeux vidéo en temps réel avec adaptation en temps réel

Nous avons commencé par expérimenter notre *Agent Neural* avec le jeu *AmbuRun* qui a été présenté dans le chapitre précédent. Durant cette expérimentation, l'*Agent Neural* intervient sur *AmbuRun* en changeant la vitesse du véhicule et la difficulté de la route selon la frustration et l'excitation du joueur. Les expérimentations et les résultats sont détaillés dans le chapitre suivant qui se présente sous la forme d'un article publié dans la conférence Flairs 2018 et intitulé « Virtual Reality Game Adaptation using Neurofeedback » et qui détaille notre méthodologie pour adapter *AmbuRun* en temps réel (Ben Abdesslem et al., 2018b).

### 4.3.2 Hypocrates: Plateforme éducative en RV pour les étudiants en médecine

*Hypocrates* est une plateforme éducative en RV qui vise à tester les connaissances et le raisonnement clinique des étudiants en médecine. *Hypocrates* contient 3 composantes globales : un environnement de RV, un générateur de cas médical et l'*Agent Neural*. La figure 4.3 représente l'architecture de *Hypocrates*.

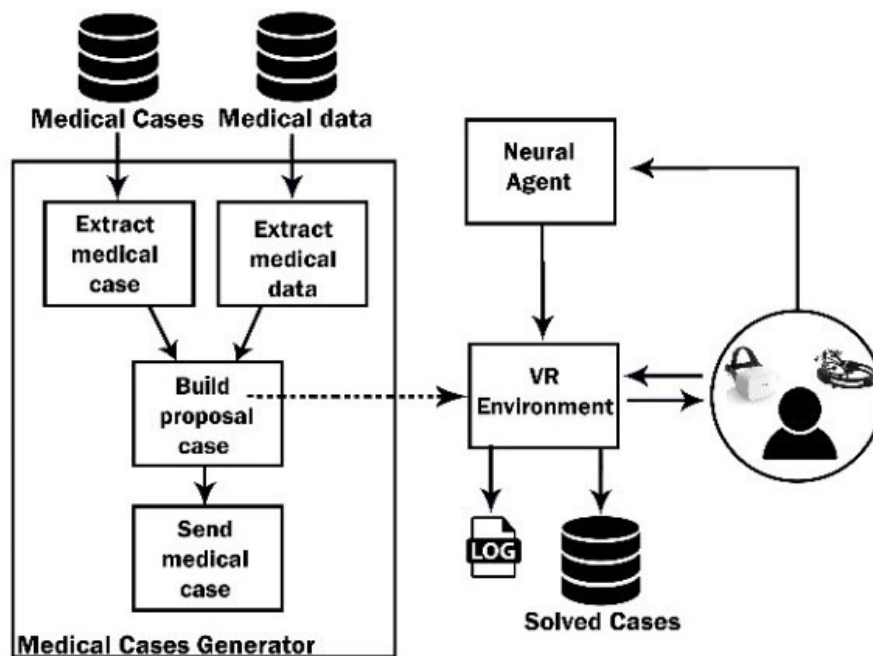


Figure 4.3 - Architecture de Hypocrates (Ben Abdesslem et al., 2018a)

Dans l'environnement de RV, les étudiants en médecine passent par une scène d'introduction dans laquelle nous leur donnons une explication du processus. Par la suite, ils sont placés dans

une salle d'opération virtuelle ou bien un cabinet de médecin selon le type du cas médical (cas d'urgence ou cas de médecine générale). Les étudiants en médecine résolvent ainsi des cas médicaux tout en interagissant avec l'EV (la figure 4.4 illustre un exemple de cas médical d'urgence). Une fois que tous les cas reçus ont été présentés à l'étudiant et qu'il les a résolus, il pourra accéder à une scène finale dans laquelle il observera tous les choix qu'il a fait et les scores obtenus.

Le rôle de l'Agent Neural dans *Hypocrates* est d'intervenir dans l'EV en provoquant les émotions des étudiants en médecine, dans le but de détecter leurs incapacités de raisonner dans une situation d'urgence et émotionnellement critique. En effet, l'agent suit en temps réel l'état émotionnel de l'étudiant ainsi que ses performances de raisonnement clinique. Lorsqu'il détecte que l'étudiant est dans un état émotionnel positif et que son raisonnement est correct, il déclenche des situations stressantes. Les interventions de l'agent peuvent générer des émotions négatives comme la frustration, ce qui peut affecter l'état mental des étudiants et par conséquent leurs performances. L'Agent Neural devrait ainsi permettre de détecter les étudiants en médecine qui ne maîtrisent pas leurs émotions et dont les performances diminuent dans des situations d'urgence.



Figure 4.4 - Exemple d'un cas médical (Ben Abdessalem et al., 2018a)

Nous avons expérimenté *Hypocrates* en utilisant notre *Agent Neural* avec 15 étudiants en 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> année médecine à l'Université de Montréal. Durant ces expériences, nous proposons de suivre en temps réel l'état émotionnel des étudiants en médecine et intervenir dans l'EV dans le but de provoquer des changements de leurs émotions et d'analyser par la suite leurs réactions suite aux erreurs commises et suite aux différentes interventions.

Les résultats montrent que suite aux interventions de l'*Agent Neural* le niveau de frustration des étudiants augmente et par conséquent, la moyenne des mauvais choix successifs augmente aussi.

Les détails et résultats de cette expériences ont été publiés dans la conférence *14th International Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS 2018)* sous forme d'un article intitulé « Emotional State and Behavior Analysis in a Virtual Reality Environment: a Medical Application » (Ben Abdesslem et al., 2018a). Nous précisons que notre contribution dans ce travail se résume à l'adaptation de l'*Agent Neural* pour qu'il fonctionne avec *Hypocrates*, préparations et participation des expérimentations ainsi que le traitement de données et la rédaction de l'article.

### **4.3.3 Hypocrates+: Hypocrates avec aide intelligente en temps réel**

*Hypocrates+* est une version du système *Hypocrates* munie d'une nouvelle composante d'aide en temps réel. L'objectif de *Hypocrates+* est de tester les compétences des étudiants en médecine mais cette fois-ci d'intervenir afin de les aider en cas de détection d'émotions négatives ou en cas d'erreur de raisonnement clinique. Le rôle de l'*Agent Neural* dans le système *Hypocrates+* n'est pas le même que dans *Hypocrates*.

Dans ce système, l'*Agent Neural* ne vise pas à provoquer les émotions des étudiants par des interventions d'urgences pour détecter leurs incapacités de bien raisonner dans des situations d'urgence. En effet, cet agent vise plutôt à éviter que les étudiants se découragent lorsqu'ils commettent des erreurs de raisonnement clinique (par exemple un faux diagnostic) et de les maintenir dans un état émotionnel et mental positif. L'Agent Neural suit l'état mental et émotionnel des étudiants ainsi que leurs performances et lorsqu'il détecte une erreur mineure dans le raisonnement clinique (par exemple l'étudiant a oublié de faire une analyse), il lui propose de l'aider. Si l'étudiant accepte l'aide, l'agent collabore avec le Système d'Aide en Temps-Réel afin

d'envoyer l'aide approprié à l'étudiant. Lorsque l'agent détecte une erreur grave (par exemple un faux diagnostic) ou une émotion négative, il intervient directement dans l'EV en affichant de l'aide. Finalement, lorsque l'agent détecte que l'étudiant est en train de résoudre correctement le cas médical, il intervient dans l'EV en affichant des messages d'encouragements afin de garder l'étudiant dans un état émotionnel et mental positif. Le Système d'Aide en Temps-Réel fonctionne comme un serveur qui reçoit une requête sous forme de mots clés et donne comme réponse des informations susceptibles d'aider les étudiants. La figure 4.5 illustre l'architecture globale de Hypocrates+.

Nous rappelons que l'Agent Neural est un agent hybride. En effet, dans *Hypocrates+*, il **raisonne** en suivant les états émotionnels, les états mentaux et les performances des étudiants en médecine, **planifie** ses interventions selon ces derniers afin d'aider et d'encourager les étudiants et **collabore** avec le Système d'Aide en Temps-Réel dans le **but** de garder les étudiants dans un état émotionnel et mental positif et par conséquent, améliorer leurs performances.

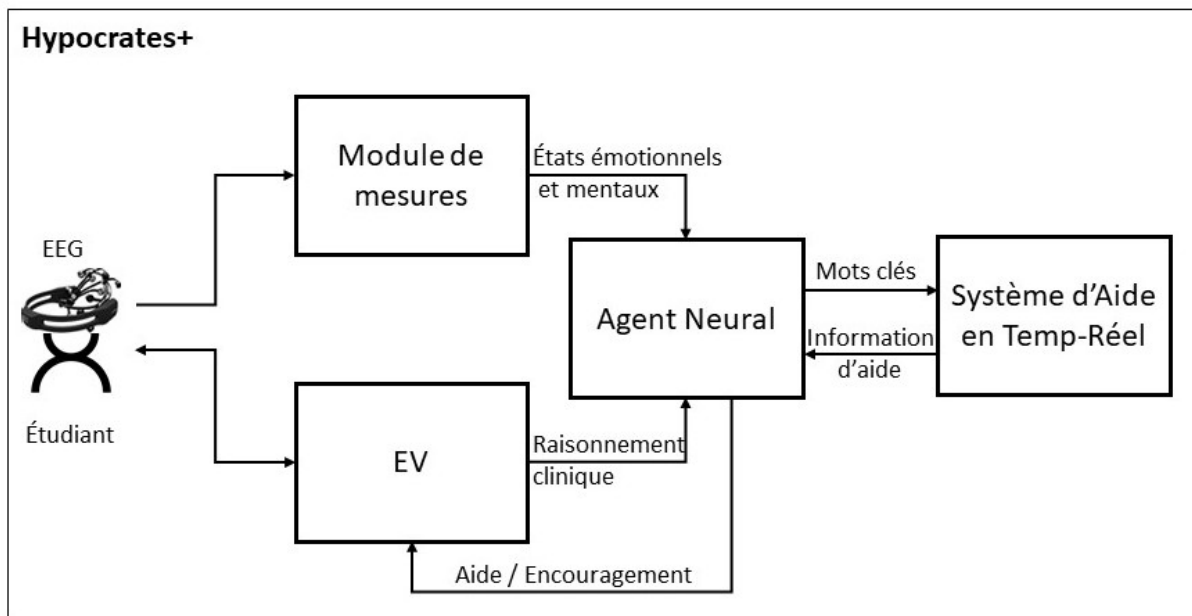


Figure 4.5 – Architecture globale du système *Hypocrates+*

Nous avons expérimenté *Hypocrates+* avec 5 étudiants en 1<sup>er</sup> et 2<sup>eme</sup> année médecine et les résultats préliminaires montrent que l'Agent Neural peut diminuer les émotions négatives à travers le déclenchement d'aide. Les détails et résultats de cette expériences ont été publiés dans

la conférence 2<sup>nd</sup> *International Conference on Brain Function Assessment in Learning (BFAL 2020)* sous forme d'un article intitulé « Hypocrates+: A Virtual Reality Medical Education Platform with Intelligent Real-Time Help System » (Q. Ye et al., 2020). Nous précisons que notre contribution dans ce travail a consisté à l'adaptation de l'*Agent Neural* afin qu'il puisse fonctionner sur ce système, la préparation et la participation aux expérimentations, au traitement des résultats et à l'écriture de l'article.

#### **4.3.4 Savannah VR : un environnement thérapeutique en RV**

*Savannah VR* est un environnement thérapeutique immersif en RV qui se base sur la thérapie de la nature (WILSON, 1984) visant à relaxer les patients Alzheimer et réduire leurs émotions négatives. Nous avons utilisé notre *Agent Neural* afin d'intervenir sur l'environnement *Savannah VR* et l'adapter pour optimiser l'effet de relaxation au patient Alzheimer et en conséquence améliorer ses performances cognitives. Nous avons expérimenté *Savannah VR* avec 19 patients diagnostiqués avec un DCS qui, nous rappelons, est considéré comme un état précoce de la maladie d'Alzheimer. *Savannah VR* ainsi que les expérimentations et les résultats sont détaillés dans le chapitre 6 qui se présente sous la forme d'un article publié dans le journal *International Journal of Intelligence Science (IJIS)* et intitulé « Optimizing Alzheimer's Disease Therapy using a Neural Intelligent Agent-Based Platform ». (Ben Abdesslem et al., 2021) .

## Chapitre 5 - Adaptation d'un jeu en RV en utilisant du neurofeedback

Dans ce chapitre, nous présentons une étude empirique qui vise à adapter, en temps réel, un jeu vidéo en modifiant certains de ses paramètres afin d'améliorer l'expérience de jeu (Game experience en anglais). Cette adaptation est réalisée grâce au neurofeedback qui, rappelons-le, est un type de biofeedback mesurant les ondes cérébrales pour la production d'un signal qui peut être utilisé comme rétroaction. En effet, l'interaction avec les jeux vidéo engendre la modification, positive ou négative, de l'état émotionnel et mental du joueur ce qui affecte en conséquence son état cognitif (performances). Par exemple, lorsque le joueur est frustré suite à un échec dans le jeu, cela va se traduire sur ses performances. Ainsi, il est intéressant de suivre l'état émotionnel et mental du joueur et d'adapter, en conséquence, les valeurs des paramètres du jeu.

Dans ce contexte, cette étude vise à explorer les mesures physiologiques et la RV dans le but d'adapter le jeu selon les niveaux d'excitation et de frustration du joueur et ainsi, améliorer son expérience de jeu. Cette adaptation est faite à travers un agent intelligent (*Agent Neural*) utilisant du neurofeedback.

Les hypothèses de cette étude sont les suivantes :

- Il est possible d'intervenir sur un EV afin d'agir sur l'état émotionnel et mental de l'utilisateur.

- Il est possible d'utiliser le neurofeedback pour adapter intelligemment le jeu et ainsi améliorer l'expérience de jeu.

Pour vérifier les hypothèses de cette étude nous avons implanté un système de neurofeedback dans un EV appelé *Amburun*. Et dans le but de tester cette approche, nous avons utilisé notre *Module de mesures*, l'*Agent Neural* et le jeu en RV *AmbuRun*.

Nous rappelons que le *Module de mesures* s'occupe de la détection et de l'extraction des valeurs des différents états émotionnels et mentaux du joueur lors de son interaction avec le jeu. Dans ce jeu, présenté brièvement à la section 2.4.2, le joueur est amené à conduire à l'hôpital une ambulance, transportant une personne malade. Durant le jeu, l'*Agent Neural* modifie les paramètres de *AmbuRun* selon la frustration et l'excitation du joueur. Il modifie la difficulté du jeu selon le niveau de frustration (état émotionnel) du joueur, et la vitesse du véhicule selon son niveau d'excitation (état mental).

Nous avons réalisé une étude expérimentale avec 20 participants dans laquelle l'*Agent Neural* adapte la vitesse et la difficulté du jeu selon l'excitation et la frustration du joueur en utilisant 4 règles d'intervention. Les résultats ont montré que lorsque l'*Agent Neural* adapte le jeu, cela agit positivement sur la frustration et l'excitation du joueur. De plus, les résultats du questionnaire d'auto-évaluation, auquel les participants ont répondu après l'expérience, ont confirmé que l'adaptation du jeu avait amélioré l'expérience de jeu.

Le reste de ce chapitre est constitué de l'article intitulé « Virtual Reality Game Adaptation using Neurofeedback » publié dans la conférence « The Thirty-First International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference (FLAIRS-31) » en 2018. Ma contribution essentielle consiste à la création du jeu vidéo « *AmbuRun* », création de l'*Agent Neural*, expérimentation, analyse des résultats et écriture de l'article. Marwa Boukadida a contribué avec ses corrections et dans la rédaction. Ce travail a été dirigé, révisé, corrigé, et financé par mon directeur de recherche Claude Frasson (NSERC-CRD, Beam Me Up et PROMPT).



# Virtual Reality Game Adaptation using Neurofeedback

Hamdi Ben Abdessalem, Marwa Boukadida and Claude Frasson

Published in: The Thirty-First International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference (FLAIRS-31), Florida, USA, May 21-23 2018, 276-281

Lien: <https://aaai.org/ocs/index.php/FLAIRS/FLAIRS18/paper/view/17688/16835>

## Abstract

Interacting with a virtual reality environment can provoke affective reactions that have an impact on user's performance. Physiological sensors help to detect these affective states, which could be ideally controlled and adapted in order to provide the best impact aimed by the game. In this paper, we propose to track users' affective states and use a neurofeedback approach to intervene in the game and modify some components in order to positively affect users' affective state and thus improve the users' game experience. We created "AmbuRun", a virtual reality game, to be dynamically modified in real time. A neurofeedback system, containing a measuring module and a neural intelligent agent, was created to control the difficulty and speed of the game in order to adapt it to each user. We evaluated our neurofeedback approach by conducting an experimental study involving 20 participants. Results shows that most of the participants reported that their game experience was improved with the adaptations of the game. Thus, the adaptation of the

parameters of the game, directed by the user's brain reactions, affected their frustration and excitement properly.

## **5.1 Introduction**

Nowadays, virtual reality (VR) is considered as one of the most rising technologies. VR has proved its importance in many fields such as social life (Freeman et al., 2014), education (Laura et Michela, 2015) and neuroscience (Bohil et al., 2011). VR has many advantages for researchers like the immersion and sense of presence, which can trick the subconscious mind of the user, so that he believes he is in a real world.

Every change in the virtual environment provokes a modification in the user's affective state. Each modification could have a different impact on the user; however, using VR, we can no longer use the traditional techniques like external judges or facial emotion recognition to recognize the impact of the environment on the user, because the VR headset hides a significant part of his face. Thus, we need other techniques in order to analyse and track the impact of each modification in real time.

Physiological measurements, like cerebral activity (EEG), eye tracking and the electrodermal activity (EDA) allow a better understanding of the user's emotional reactions while interacting with a virtual environment. VR environments generate extreme emotions due to the sense of presence, therefore, the physiological sensors are indispensable in order to study and analyse the evolution of users' affective state.

It is interesting to explore these two techniques, physiological sensors, and VR, in gaming in order to improve the game experience. In fact, the game experience could be improved by optimising the users' affective states through game adaptations. Using neurofeedback loop, we can intervene on the game's parameters in order to affect players' affective states and thus adapt the game for a better game experience.

Therefore, it is important to firstly, measure these emotions and secondly, try to adapt the environment to the user. Our main hypothesis are:

**H1:** it is possible to intervene on a virtual environment in order to affect the emotions of the user.

**H2:** it is possible to use neurofeedback to intelligently adapt the game and thus improve the game experience of the player.

The goal of our research is to intervene on the VR game, assess the impact of these interventions, and adapt the game with adaptation strategy according to the player's affective state using a neurofeedback approach. Our adaptation strategy focuses not only the game parameters and the player's actions in the game but also the affective states.

The rest of this paper is organized as follows. An overview of the related works is given in Section 5.2. In Section 5.3, we describe our VR game "AmbuRun". In section 5.4, we present our neurofeedback system, which contains a neural agent and a measuring module. Section 5.5 details the experiment, which led to the results, presented and discussed in section 5.6.

## **5.2 Related Works**

### **5.2.1 Brain Assessment and Neurofeedback**

Several researches are based on EEG signals in order to recognize the user's emotions and mental states. An IAPS (International Affective Picture System) study was driven on students by showing them different images that provoke some emotions while measuring their mental activity with EEG. Horlings and his colleagues (Horlings et al., 2008) showed that EEG allows the recognition and classification of users' emotions.

Another study intended to detect, in real-time, participants' valence (positive or negative emotion) while they were watching videos (Soleymani et al., 2014). Chaouachi and Frasson (Chaouachi et Frasson, 2012) used as well EEG in order to extract engagement and workload indexes, which are two mental states indexes, in their system.

EEG is not only used in emotion's detection. It can also be used in other fields. Gilley and his colleagues (Gilley et al., 2014) measured the spectral disturbances of children with language-

learning problems by using EEG. They showed that insufficient oscillations in the beta frequency might explain language disorders.

Brain assessment using EEG and eye tracking is mostly used in neurofeedback which is a type of biofeedback that measures brain waves and mental states indexes that can be used as feedback (Sherlin et al., 2011). Neurofeedback using a brain-computer interface, helps people manage some aspects of their neuronal activity and thus develop skills for self-regulation of their brain activity (H. Heinrich et al., 2007; Van Doren et al., 2017).

### **5.2.2 Virtual Reality**

In the recent years, VR began to be more widely used in many different fields for its numerous benefits. The major advantage of virtual reality environment compared to other interactive environments is that combining a virtual reality headset with headphones increases the concentration and ensures a total isolation from any external distractions. Therefore, the user is totally immersed in the virtual environment as if he was in a real one and that way his learning ability and performance will be highly promoted (Biocca, 2006).

In fact, thanks to virtual reality environments, researchers can manipulate multimodal stimulus inputs. That way they generate a sensorimotor illusion to the user giving him a sense of presence in the virtual environment (Bohil et al., 2011).

In the field of neuroscience virtual reality is used to establish a direct link between the user's nervous system and the properties of the virtual environment (Lecuyer et al., 2008). Researchers proved that, using EEG signals, we can control objects in virtual reality (McFarland et al., 2010). In the field of psychology, virtual reality treats a vast number of disorders, like brain damage (Rose et al., 2005), relief of fear (Alvarez et al., 2007) and anxiety disorders (Gorini et Riva, 2008).

In fact, virtual reality allows us to control the user experience in psychiatric treatments by enhancing the transfer of results to the real world, with a potentially high degree of realism.

### **5.2.3 Adaptive Systems**

Users' adaptation approaches can be divided into two principal categories. The first category takes into consideration users' emotions and mental states through different physiological sensing approaches in adapting the system, and the second one consists in focusing on the users' seek for help or the system's feedback.

In the first category Chaouachi et al. (Chaouachi et al., 2015a) integrated two mental states indexes extracted from EEG (engagement and workload) in their system. They used some rules in order to maintain users in a positive mental state while learning.

Some researchers focused on adapting games for players. In order to improve the player's intuitive reasoning in a physics VR game, according to their frustration and engagement indexes, Ghali et al. (Ghali et al., 2017) changed assistance strategies in real-time.

Salen and Zimmerman (Salen et Zimmerman, 2010) assumed that adaptive artificial intelligence in games can be affected by how the player interacts with it. They listed four modes of interactivity with computer games, which are the cognitive, the functional, explicit and cultural interaction.

In this paper, we are interested by the cognitive interaction mode in games, neurofeedback and brain assessment in order to adapt a VR game to the player's emotion. In the next section, we will present "AmbuRun" VR game, which will be our testing virtual environment.

## **5.3 AmbuRun: an adaptable VR game**

In order to test our neurofeedback approach, we started by creating an adaptable VR game called AmbuRun. The reason of creating this game in VR is that, as we saw in the previous section, VR helps us isolating the player and gives him more immersion (Ben Abdesslem et Frasson, 2017).

In AmbuRun, an ambulance is carrying a sick person. The player takes control of the ambulance and tries to arrive safely at the hospital with less damage in order to save the person. The player should avoid a collision with the cars, buses and trucks on the road in order to arrive without harm.

The user interface of the game has three components: number of kilometers that the player has reached, health bar of the sick person and number of attempts. The difference between cars and trucks in the game is that, if the player hits a car, the health of the sick person will decrease but if he hits a truck, the sick person will die and the player must try again.

We designed AmbuRun in a way that we can dynamically modify the difficulty of the game and the speed of the ambulance in real time and remotely from another application. In this game, there are two levels of difficulty, which are “easy” and “hard” according to the terminology used in games. The modification of the difficulty will modify the number of cars and trucks on the road. If the player encounters few cars or trucks in the game, the difficulty will be easy for him and if he cruises too many cars, the game will become hard. Figure 5.1 illustrates a screen capture of AmbuRun while the difficulty is easy and figure 5.2 illustrates a screen capture of the game while the difficulty is hard.



Figure 5.1 - Screen capture of AmbuRun (difficulty = easy)



Figure 5.2 - Screen capture of AmbuRun (difficulty = hard)

The dynamic modification of the speed targets only the speed of the ambulance. The speed can go gradually from slow to fast and reciprocally.

We created this game using 3D objects (Ambulance, cars, trucks, buses, roads, etc.) from unity asset store and we used the Unity3D games engine, which contains a built-in physics engine able to simulate collisions. AmbuRun is optimized in order to run and react quickly in FOVE headset. FOVE has a built-in accelerometer so when the player turns his head he can see the VR environment in 360 degrees and it contains an integrated eye-tracking module. The player controls this game using a wireless game pad on which he uses the left joystick in order to translate the ambulance on the left and on the right.

In the next section, we will present our neurofeedback system, which will use AmbuRun as a virtual environment.

## 5.4 Neurofeedback System

In order to achieve our goals, we created a neurofeedback system. This system is composed of three main parts; the first one is the VR environment, the second one is the measuring module, and the last one is the neural agent.

### 5.4.1 VR Environment

This VR environment is a dynamic system able to produce sounds, music, effects, 3D models, etc. It could be a game, video, etc. and it should be dynamically adaptable in real time. This environment is an important component in our neurofeedback system because it is what the user constantly sees and, in which, many elements could change in real time. In this paper we used “AmbuRun”, the game presented in the previous section as our VR environment.

### 5.4.2 Measuring Module

The measuring module handles the detection of different mental states and emotions. It gathers the different signals from different measuring tools, synchronizes, analyzes them, and extracts the mental states and the emotions values. This module sends these values to other modules or agents in the system through the network and stores these data in a database. It contains four components: “Sensors”, “Measurement”, “Processing”, and “Database” (see Figure 5.3).

**Sensors.** This component handles the physiological sensors connected to the user (EEG, EDA, Eye Tracker). Using these sensors, we can collect the physiological reactions of the user while he interacts with the VR environment.

**Measurement.** This component manages the communications and synchronization between the physiological sensors. It gathers data from the sensors and send them to the processing component.

**Processing.** It analyzes and processes data coming from measuring component then converts the results into indexes of emotions and brain states. It also manages the communication between this module and the other modules or agents in our system.

**Database.** This component is a database in which the module stores the raw data of the various physiological sensors, the results of processed data and the information about the VR environment.



### 5.4.3 Neural Agent

The neural agent is an intelligent agent that tracks the emotion of the user and intervenes on the VR environment. Giving the emotional state of the user, the agent chooses a rule from the rules base and intervenes on the VR environment. After each intervention, the agent observes the emotional reactions of the user to check whether it modifies his emotional state. After that, the agent analyzes the result of the intervention and intervenes again on the VR environment.

The neural agent runs in real time to analyze evolution of user's emotional state. The agent operates in a neurofeedback loop with the measuring module in order to change the emotional state of the user, which will indirectly triggers a modification of the virtual environment and adapt it to the user. The neural agent is composed of two modules: "**Decision**" and "**Rules base Manager**" and two databases "**Decisions base**" and "**Rules base**". Figure 5.3 illustrates the role of the neural agent in the neurofeedback system and its interactions with the measuring module.

**Decision.** This module has four components "*reception*", "*analysis*", "*decision*" and "*action*". The first one handles the reception of the data received from the measurement module. These data are the emotional states of the user and the information about the VR environment. This component handles the synchronization of all the incoming data and transmits them to the second component on the module.

The *analysis* component receives the information from the reception component and uses this information to recognize the user's emotional state and the state of the VR environment. Then it analyzes these states in order to identify the main emotion or mental state of the user.

The *decision* component receives the user's emotional states, VR environment information, and results of analysis component. Afterward, it consults the rules base in order to extract the rule to apply in this case. After that, it consults the decision base to check whether the rule was applied or not, and to check the impact of this rule on the user. Then, this component confirms or changes the choice of the intervention rule, takes the final decision and stores it in the decisions base. Meanwhile, it sends the result to the action component.

The *action* component receives the decisions from the previous one and the state of the VR environment. After that, this component adjusts the action requested by the rule to the type of the VR environment and sends the intervention action. Finally, the VR environment receives the intervention action and executes it instantly.

**Decisions base.** The decision base is a database containing the history of decisions taken by the module presented previously. Each decision is stored with the time, the emotion of the user, the VR environment state and the chosen rule.

**Rules base manager.** This module allows the management of the intervention rules. The three main functionalities are adding, modifying, and deleting of an intervention rule.

**Rules base.** The rules base is the base that contains all the rules of intervention. An intervention rule is defined as “id, name, description, initial state, target state, action and weight”.

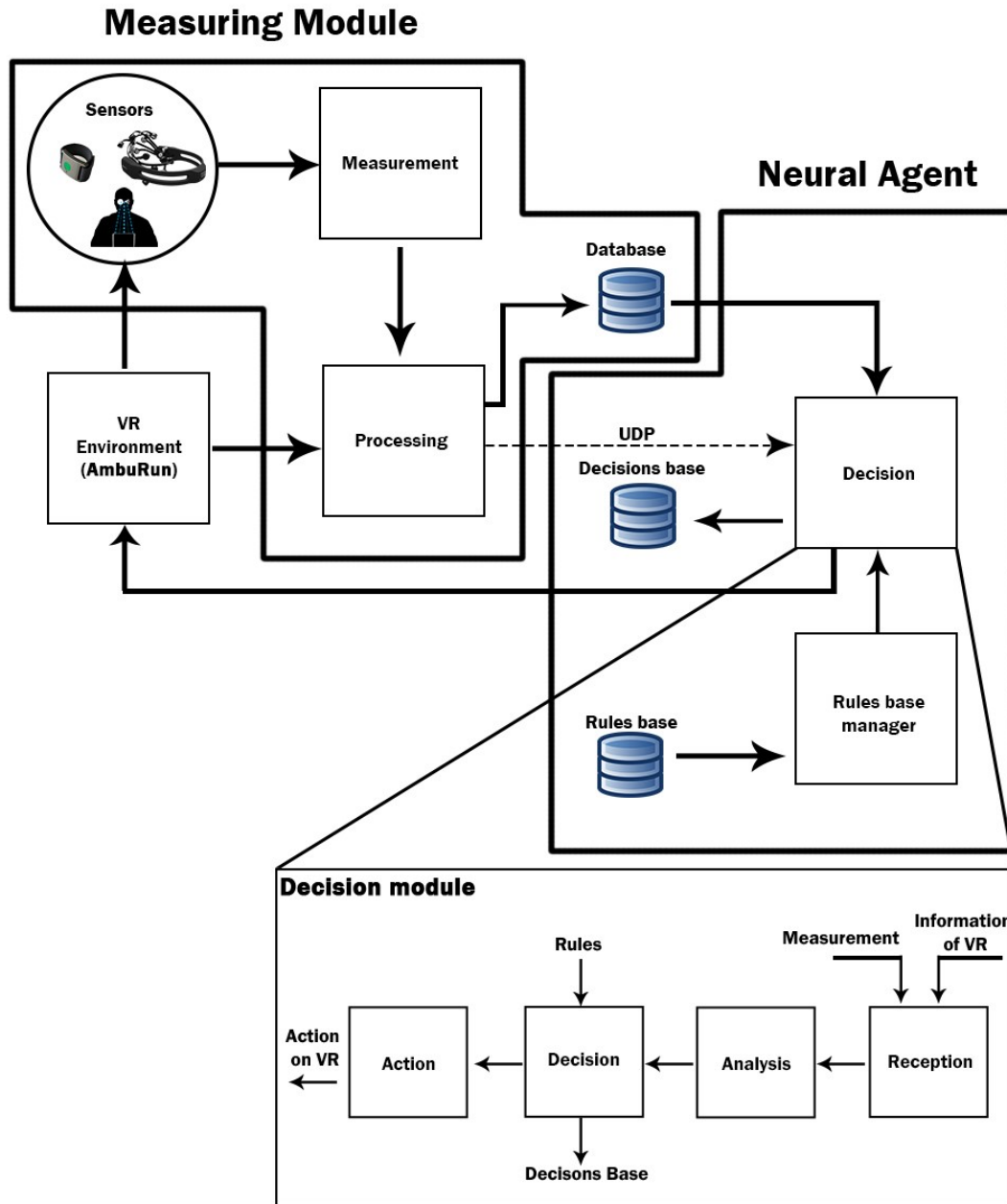


Figure 5.3 - Architecture of the neurofeedback system

Our neurofeedback system operates as a two-way loop; in one way, the modification of the environment will trigger a modification in the affective state of the user and in another way, this change will trigger another adaptation of the game.

## 5.5 Experiment

In order to study the effectiveness of our approach, we built AmbuRun the VR game presented on the previous section. We experimented our approach on 20 participants (10 males and 10 females, mean age = 31.05, SD age = 4.96). In this experiment, we test our approach using two emotional states from the measuring module (Excitement and Frustration).

Our strategy is to vary the level of frustration in order to vary the difficulty of the game, and to vary the level of excitement in order to vary the speed of the game. Therefore, we added four rules to the rules base of the neural agent. In the first one, we stipulate that the difficulty of the game will increase if the level of frustration decreases. In the second one, we stipulate that the difficulty of the game will decrease if the level of frustration increases. The third one defines that the speed of the game will increase if the level of excitement decreases. In addition, the fourth and last rule, defines that the speed of the game decreases when the level of excitement increases.

### 5.5.1 Experimental protocol

In the first step of the experiment (see figure 5.4), the participant signs an ethic form which explains the study and fills a pre-session form. In the second step, we install an Emotiv EPOC headset on the head of the participant. In the third step, the participant is equipped with the Fove VR headset and we give him a wireless gamepad to control the game. After these steps, we start the agent and the AmbuRun VR game. During the experiment, every 20 seconds, the agent calculates the means of frustration and excitement and compares them to the baseline to extract the main emotion. Finally, the agent chooses the appropriate intervention rule, and sends the action to the game. After the experiment, the participant fills a post-session form that aims to report the adaptation felt while playing and his emotional state before this adaptation.

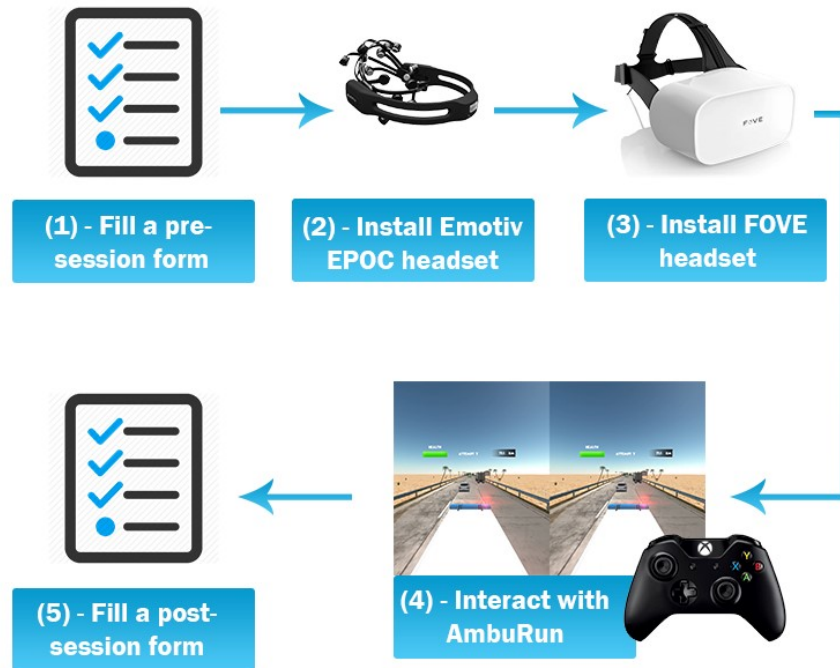


Figure 5.4 - Process of the experiment

This neurofeedback loop (AmbuRun → Measurement of emotions → intervention of the agent → AmbuRun) aims to adapt the game according to the frustration and excitement of the participant.

## 5.6 Results and discussion

To confirm the effectiveness of our approach and to study the emotional state effect resulting after each intervention in the game, we analysed the players' post-session self-report. Like shown in Figure 5.5 - Part 1, we notice that when the main emotion was not frustrated (frustration above the baseline), 70% of the players reported that the game went harder while 15% of them did not felt a change of difficulty and the other 15% noticed that the game was easier for them. And when the main emotion felt was frustration, 75% of players reported that the game went easier while 10% did not feel a change and the other 15% felt the opposite (Figure 5.5 - Part 2). Part 3 of Figure 5.5 shows that when the players were not excited, 90% of them felt that the ambulance went faster and 10% reported that they did not notice a change in the speed of the ambulance. Finally, part 4 of Figure 5.5 indicates that when the main emotion of the players was excitement, 90% of

them reported that the speed of the ambulance decreased while 5% did not feel a change of speed and 5% feel that the game went faster. In addition, 95% of the player reported that their game experience improved with the adaptations of the game and 5% did not feel any difference.

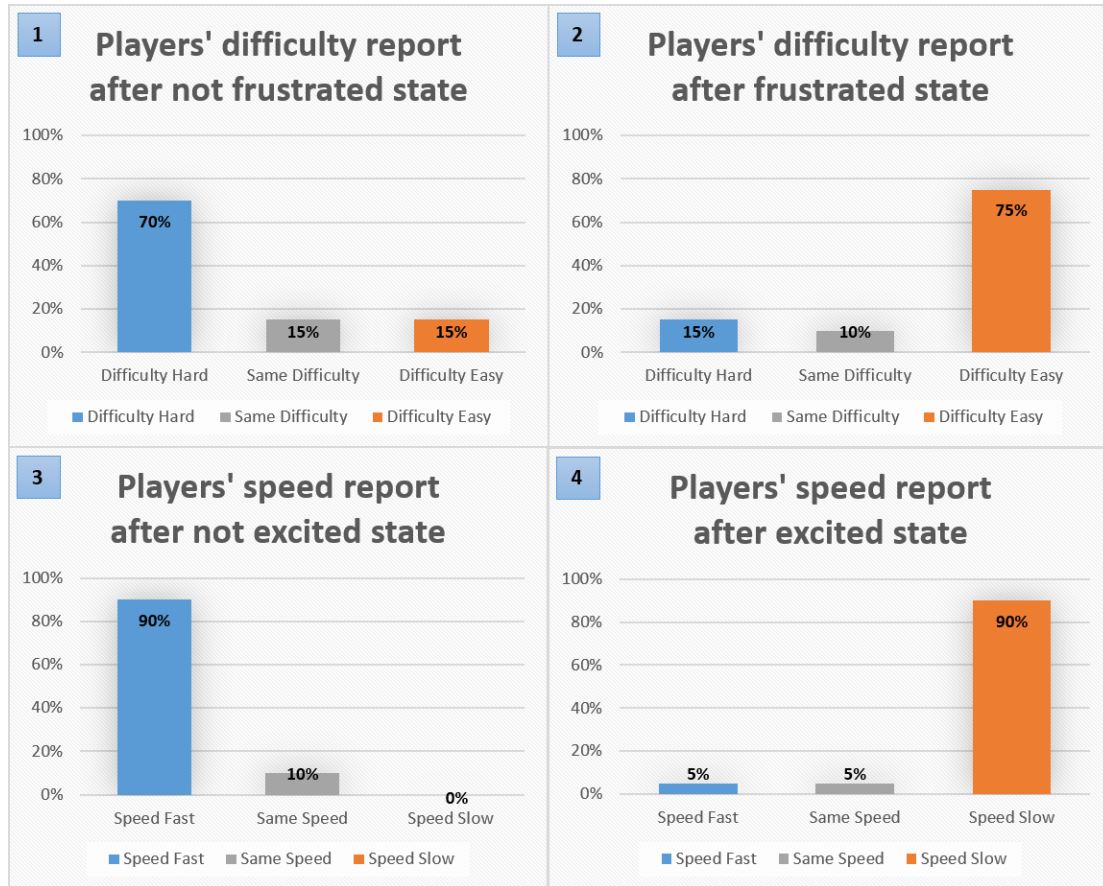


Figure 5.5 - Descriptive results of players' report

In addition to these results, we also conducted an analysis of variance ANOVA to see if the indexes of frustration and excitement before and after the interventions are statistically different for all the participants. As described in table 5.1, the results are significant and show that frustration and excitement before and after the intervention on the game are different.

Table 5.1 - ANOVA results

Emotion	Action	F	P	Mean before	Mean after
Frustration	Harder	13.60	0.000*	0.531	0.600
	Easier	9.468	0.002*	0.614	0.551
Excitement	Faster	6.964	0.009*	0.437	0.488
	Slower	7.864	0.005*	0.548	0.488

We note that the mean level of frustration increases from 0.531 to 0.600 (6.9% more) when the agent makes the game harder and similarly decreases from 0.614 to 0.551 (6.3% less) when the agent makes the game easier. In addition, the mean excitement increases from 0.437 to 0.488 (5.2% more) when the agent made the ambulance go faster, and decreases from 0.548 to 0.488 (6% less) when the agent made the ambulance go slower. These results support the hypothesis that it is possible to intervene on a virtual environment in order to change the affective state of the participant using neurofeedback. Moreover, the participants' self-report results show that it is possible to adapt a game intelligently in order to improve the players' game experience. Thus, the participants' affective state reacted mostly as expected to the interventions of the agent and adaptations of the game.

## 5.7 Conclusion

In this paper, we presented a brain-driven VR game using a neurofeedback approach. For that, we created AmbuRun, a VR game able to be adapted on demand from the neural agent. The dynamic measurements of user's emotional reactions are controlled by the intelligent neural agent which supervise the global interaction. We conducted experiments and tests. Participants reported their feel of change in the game and most of them confirmed the adaptation of the game gave them a better game experience. In addition, results showed that when the neural agent adapts the game for the participant, by modifying the difficulty and the speed according to his frustration and excitement, it affects the level of his frustration and excitement in the right way. The advantage of such a system is that it can be applied to control the impact of any virtual

environment. Thus, several applications, such as education and health, can use this approach. Further work will aim to experiment more rules that could affect other emotions.

## **Acknowledgments**

We acknowledge NSERC-CRD and Beam Me Up for funding this work.



# Chapitre 6 - Optimisation de la thérapie pour des patients atteints de la maladie d'Alzheimer en utilisant un Agent Neural

Dans ce chapitre, nous présentons une étude empirique qui vise à optimiser des EVs thérapeutiques relaxants pour des patients atteints de la maladie d'Alzheimer. Cette optimisation est réalisée grâce à l'adaptation des EVs en utilisant un *Agent Neural*. En effet, les patients atteints de la maladie d'Alzheimer sont submergés d'émotions négatives ce qui peut les empêcher d'accéder à leur mémoire. Les environnements de relaxation ont la capacité de réduire les émotions négatives. Cette réduction pourrait améliorer les performances de la mémoire et de l'attention chez ces patients. De plus, chaque patient est unique et, par conséquent ne réagit pas de la même manière que les autres patients aux environnements. L'adaptation de ces environnements pour chaque patient peut, ainsi, optimiser son effet de relaxation.

Dans ce contexte, cette étude vise à rechercher comment des EVs de relaxation peuvent réduire les émotions négatives des patients atteints par la maladie d'Alzheimer et, par conséquent, améliorer leurs performances de mémoire et d'attention. Cette étude permet d'investiguer l'utilisation d'agents intelligents dans l'adaptation des environnements thérapeutiques relaxants pour les patients atteints de la maladie d'Alzheimer.

Les hypothèses de cette étude sont les suivantes :

- Les environnements de relaxation réduisent les émotions négatives,

- Les environnements de relaxation améliorent les performances de mémoire et d'attention,
- Un agent intelligent peut adapter les environnements de relaxation afin d'optimiser leurs effets.

Pour vérifier les hypothèses de cette étude, nous proposons d'expérimenter trois environnements relaxants avec différents niveaux d'adaptations. Le premier étant l'environnement ***Train Virtuel*** présenté dans la section 2.4.3. Nous rappelons que dans cet environnement, le patient voyage dans un train virtuel en utilisant un casque de RV. Durant le voyage, le train passe par 3 scènes; une forêt, un désert et des montagnes de neiges. Le deuxième environnement est un théâtre musical thérapeutique en RV que nous appelons ***Musique Thérapeutique***. Dans cet environnement, les patients écoutent des morceaux de musique ancienne, qui ont pour but d'augmenter les émotions positives, en regardant des animations d'instruments de musique spécifiques à chaque morceau. Le troisième environnement thérapeutique relaxant est intitulé ***Savannah VR***. Dans cet environnement, les patients suivent une gazelle qui se promène à travers une savane et rencontre différents animaux.

Nous avons expérimenté chaque environnement séparément avec 19 participants atteints de DCS, qui, rappelons-le, est une forme précoce de la maladie d'Alzheimer. Durant ces expérimentations, nous n'avons pas fait d'adaptation pour le *Train Virtuel*. Nous avons adapté l'environnement *Musique Thérapeutique* en utilisant un agent intelligent que nous appelons Agent d'adaptation musicale. La fonctionnalité de cet agent est de rejouer le morceau de musique le plus apprécié par le patient plus longtemps. Finalement, nous avons adapté l'environnement *Savannah VR* en utilisant notre *Agent Neural*. Cet agent change les paramètres de l'environnement (volume, lumière, nombre d'animaux, nombre d'arbre, etc.) selon l'état émotionnel et mental des patients afin d'adapter *Savannah VR* et optimiser son effet relaxant pour chaque patient. Afin d'analyser l'amélioration de la performance de mémoire et d'attention de chaque environnement, les patients effectuent des exercices de mémoire et d'attention avant et après les environnements relaxants avec des exemples différents.

Pour *Train Virtuel*, les résultats ont montré que l'environnement est capable de réduire la frustration des patients durant la thérapie. Après *Train Virtuel*, la frustration remonte un peu mais n'atteint pas le niveau initial. De plus, après un passage en *Train Virtuel* les performances de mémoire des patients s'améliorent.

En ce qui concerne *Musique Thérapeutique*, les résultats ont montré que l'environnement est capable de réduire la frustration des patients durant la thérapie. Cependant, elle remonte légèrement après l'environnement sans pour autant atteindre le niveau initial. De plus, les résultats ont montré que lorsque l'agent d'adaptation musical rejoue le morceau le plus apprécié par le patient, le niveau de frustration de ce dernier diminue par rapport à celui d'avant l'adaptation de l'environnement. Finalement, les résultats ont montré que l'environnement de musique avec l'adaptation de l'agent peuvent augmenter la performance de mémoire des patients. Nous avons pu montrer (Byrns et al., 2020b) les raisons profondes de l'amélioration par la musique qui est basée sur la libération de dopamine apte à réduire les hormones de stress.

Pour l'environnement *Savannah VR*, les résultats ont montré que l'environnement réduit la frustration des patients durant la thérapie et l'effet de la relaxation demeure le même après celle-ci. Les résultats ont montré aussi que, lorsque l'*Agent Neural* adapte l'EV, il amplifie l'effet de la relaxation sur les participants. Les résultats ont montré aussi que les performances de mémoire des patients s'améliorent après *Savannah VR* et l'adaptation de l'*Agent Neural*.

La comparaison des trois environnements avec différents niveaux d'adaptation a montré que plus nous adaptons l'environnement plus la durée de l'effet de la relaxation augmente. Le système qui inclut *Savannah VR* et l'*Agent Neural* a fourni le meilleur résultat en termes de durée de l'effet de la relaxation. La comparaison montre aussi que, plus nous adaptons l'environnement, plus les performances de mémorisation s'améliorent. Le système qui contient l'*Agent Neural* a conduit à de meilleurs résultats de performance de mémorisation ce qui confirme l'importance de l'utilisation de ce dernier.

Le reste de ce chapitre est constitué de l'article intitulé « Virtual Reality Game Adaptation using Neurofeedback » publié dans le journal « International Journal of Intelligence Science (IJIS) » en 2021. Mes contributions dans cet article consistent à : la création de l'environnement *Train*

*Virtuel*, la création de l'agent d'adaptation musicale, de l'*Agent Neural* en plus de la préparation et des expérimentations des trois environnements, traitement des résultats et écriture de l'article de journal. Alexie Byrns a créé l'environnement *Musique Thérapeutique* et a contribué à l'écriture et correction de l'article. Caroline Dakouré a créé l'environnement *Savannah VR*. Cette recherche s'est faite en collaboration avec l'équipe de recherche du Pr. Sylvie Belleville de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal (IUGM) qui a contribué par le recrutement et la présélection des patients. Ce travail a été dirigé, révisé, corrigé, et financé par mon directeur de recherche Claude Frasson (NSERC-CRD, Beam Me Up et PROMPT).

# Optimizing Alzheimer's Disease Therapy using a Neural Intelligent Agent-Based Platform

Hamdi Ben Abdesslem, Alexie Byrns and Claude Frasson

Published in: *International Journal of Intelligence Science (IJIS)*, 11(02), 70-96

Lien: [https://www.scirp.org/pdf/ijis\\_2021040714521321.pdf](https://www.scirp.org/pdf/ijis_2021040714521321.pdf)

## Abstract

Alzheimer's disease affects millions of persons every year. Negative emotions such as stress and frustration have a negative impact on memory function and Alzheimer's patients experience more negative emotions than healthy adults. Non-pharmacological treatment such as immersion in virtual environments could help Alzheimer patients by reducing their negative emotions, but it has restrictions and requirements. In this work, we present three virtual reality relaxing systems in which the patients are immersed in relaxing environments. We propose to use intelligent agents in order to adapt the relaxing environment to each participant and optimize its relaxation effect. The intelligent agents track the emotions of patients using electroencephalography as input in order to adapt the environments. We designed each system with different levels of intelligence in order to analyze the impact of the adaptation on the patients. Experiments were performed for each system on participants with subjective cognitive decline. Results show that these relaxing systems can reduce negative emotions and improve participants' memory performance. The positive effects on affective state and memory persisted for a longer period of

time and were generally more effective for the systems with more intelligence. We believe that the combination of relaxing environment, virtual reality, intelligent agents for adapting the environment, and brain assessment is a promising method for helping Alzheimer's patients.

**Keywords:** EEG, Brain Assessment, Intelligent Agent, Virtual Reality, Alzheimer's Disease, Subjective Cognitive Decline, Emotions, Adaptation, Emotional Intelligence.

## 6.1 Introduction

Alzheimer's disease (AD) is known for its devastating effects on memory and other cognitive functions, but the emotional and psychological aspects of the disease are often overlooked. Anxiety, apathy and dysphoria are common symptoms of the disease which can significantly reduce wellbeing (Benoit et al., 1999a).

Individuals aged 65 and older are the most vulnerable to the disease, with vulnerability increasing with age (Boyle et al., 2019). Early signs of the disease may include such things as loss of smell (Mesholam et al., 1998), disorientation (Coughlan et al., 2018) and an increased frequency in memory lapses (Slot et al., 2019). AD is a neurodegenerative disease and therefore progressively gets worse over time. At its earliest phase, it is often characterized by a state of Subjective Cognitive Decline (SCD). With the progression of the disease, a large proportion of AD patients experience symptoms of depression and increased levels of anxiety.

Some pharmacological interventions may reduce symptoms of AD, but none can cure the disease. AD causes negative emotions such as apathy and frustration to settle in patients renders them emotionally unresponsive (Landes et al., 2001). New forms of non-pharmacological treatments aiming to alleviate patients are in great demand, especially relaxing techniques which help reduce negative emotions. Some researchers showed that non-pharmacological interventions, including music therapy and psychotherapy, can have positive effects on cognitive function, behavioral problems, mood and functional abilities for older adults suffering from mild cognitive impairment or dementia (Tsoi et al., 2018). Bearing these benefits in mind, this study focuses on relaxing Virtual Reality (VR) environments as a type of non-pharmacological treatment.

VR environments have the advantage that they can be designed, controlled and configured more easily in comparison with real environments. VR has the potential of creating a therapeutic environment isolated from external disturbances offering complete control of the environment to the experimenters.

Furthermore, techniques such as electroencephalography (EEG) and eye tracking have been used to assess the emotional state of human being (Ben Abdesslem et al., 2019b; Berka et al., 2007). These techniques help track AD patients' negative emotions. By using EEG, we aim to get an inside view of our participants' emotion. Combined with EEG, intelligent agents can intervene on the relaxing VR environments in order to adapt them for each user. The EEG inputs allow the agents to understand patients' emotional reactions so they can change environment parameters according to them.

We conducted experiments with SCD participants in order to verify the following hypotheses: **H1: Relaxing environments reduce negative emotions**, **H2: Relaxing environments improve attention and memory performance** and **H3: Intelligent Agents can adapt relaxing environments in order to optimize its effect.**

The rest of this paper is organized as follows. In section 6.2, we give an overview of the related works. Section 6.3 presents our approach. In section 6.4, 6.5 and 6.6 we present the three relaxing systems we developed. Section 6.7 details the experimental procedure, the cognitive tests, and the physiological sensors that we use. Finally, in section 6.8 we present and discuss the obtained results.

## **6.2 Related Works**

### **6.2.1 Relaxation environment as treatment for Alzheimer's disease**

#### 6.2.1.1 Travel Theory

Travel therapy is not a particularly popular type of intervention, but neither is it particularly explored. Quick research on the topic shows that travel is used for relationship therapy (Durko et Petrick, 2016; Schaler, 2009), but there is little to no literature on the uses of travel therapy for

neurological disorders such as AD other than indoor traveling (Lancioni, Perilli, et al., 2013; Lancioni, Singh, et al., 2013). We found only one exception; the study carried out by Biamonti and colleagues (Biamonti et al., 2014).

In their study, researchers explored the psychological and behavioral impacts that virtual travel could have on AD patients in two contexts: the first being a mediocre replicate of a physical train, and the second being a more realistic physical train replicate. Results of the study showed that virtual travel by means of a computerized train increased well-being in individuals with AD. More precisely, participants experienced positive changes in wandering, agitation, anxiety, apathy and sleep (Biamonti et al., 2014). These improvements in psychological and behavioral states are valuable, as these are typical symptoms of AD which significantly diminish the quality of life of patients and even caretakers.

We believe that virtual travel influences behavior and psychological states by first influencing emotional states. Indeed, individuals with AD often require specialized care which generally causes distance between patients and their loved ones. In such situations, feelings of loneliness and isolation are not uncommon. It is well known that loneliness can have negative effects on individuals (Cacioppo et Cacioppo, 2018; Hawkley et Cacioppo, 2003; L. M. Heinrich et Gullone, 2006). Through virtual travel, participants can break the cycle of loneliness and isolation. We believe that virtual travel positively influences emotional states of participants which in turn promote well-being.

#### 6.2.1.2 Music Theory

Music as a therapeutic intervention is commonly used in different health conditions, such as autism, brain injury, depression, anxiety and dementia (Bradt et al., 2010; Geretsegger et al., 2014; Gutiérrez et Camarena, 2015; Vink et al., 2003). It has repeatedly shown to be effective in improving psychological and behavioral states.

Effects of music therapy (MT) on psychological state include decreased stress, anxiety and depression, improved emotional states and relationships with caregivers (José Enrique de la Rubia Ortí et al., 2018; Gallego et García, 2017; King et al., 2019; Ray et Mittelman, 2017). Studies often report that the participants seem generally happier following the MT intervention,



suggesting an increased well-being (Jose Enrique de la Rubia Ortí et al., 2019). Behavioral changes following these interventions include decreased agitation and wandering, two common and potentially dangerous symptoms of the disease. Finally, MT can also be beneficial on a cognitive level. Studies show slowed cognitive decline and improved orientation, memory and other cognitive functions in patients following a MT session (Chang et al., 2015; Gallego et García, 2017; Peck et al., 2016; Zhang et al., 2017).

Although the mechanisms by which MT generates positive changes in well-being and potential neurological rehabilitation are not clear, its effects are unmistakable. We believe that some of these effects can be attributable to music's capacity to easily influence emotional states. By increasing positive emotions, we believe that participants become in a favorable cognitive environment.

#### 6.2.1.3 Savannah Theory

The term savannah refers here to open environments with short grass, deciduous green trees, water, and animal life. Ancient survival challenges led to a correlation between natural landscapes and positive feelings. Savannah as a natural environment brings back the feeling of tranquility and peace (Frumkin, 2001).

Spreading trees in savannah gives a feeling of security because they provided early humans with a place to observe or hide from predators. The savannah is an ideal place to travel and explore, it attracts attention and relaxes thanks to its varied and pleasant landscapes.

Wilson introduced the world biophilia in 1984, referring to an innate affinity that people have with nature (WILSON, 1984). Savannah landscapes are preferred by modern humans since the first humans lived for thousands of years in the African savannah (Balling et Falk, 1982).

In addition, Meidenbauer K. L. et al. (Meidenbauer et al., 2019) demonstrated in their research that adults have aesthetic preferences for natural environments over urban ones which influenced theories like Biophilia to explain why nature is beneficial for mood improvement. They showed that children demonstrated preferences for urban over natural environments and those

urban preferences decreased significantly with age. Both adults and children showed cognitive and affective benefits after nature exposure.

We believe that savannah and natural environments are appreciated and help relax AD patients which will increase positive emotions and decrease negative emotions.

### **6.2.2 Virtual Reality**

The main characteristics of VR are immersion, sense of presence, and interactivity (Walsh et Pawlowski, 2002). These characteristics can be very beneficial and thus VR is rapidly gaining interest in many fields. Biocca et al. defined it as a sum of hardware and software systems that attempt to generate a sensory illusion of being present in another environment different from the one where the user is present physically (Biocca et Levy, 1995).

VR is used as a therapeutic tool in psychology and psychiatry. Dana et al. (Horváthová et Siládi, 2016) have used VR to create virtual environments as treatments for certain types of phobias. They created objects, environments and situations simulating exposure therapy which helps patients face their fear. Moreover, Lorenzo G. et al. (Lorenzo et al., 2016) have used VR systems with children diagnosed with autism spectrum disorders in order to enhance their emotional skills.

VR interventions are also used to treat pain. Tennant M. et al. (Tennant et al., 2020) investigated the treatment efficacy difference between immersive VR and an iPad on oncology patients' physical and emotional states. Participants who had used VR reported greater improvements in their mood states and reductions in their negative symptoms. The preliminary results of this study support the use of VR in clinical oncology in order to improve patient well-being.

Moreover, many studies revealed that VR is beneficial with AD patients. In fact, some studies have indicated that VR intervention could improve cognitive functions of individuals with mild cognitive impairment (MCI) or AD (Coyle et al., 2015; Hill et al., 2017).

### **6.2.3 Adaptative systems and Intelligent Agents**

Adaptative systems are used in many fields to provide personalized experiences for each user. There are many examples of such instances. For instance, in the learning domain, Chaouachi et al. (Chaouachi et al., 2015a) used adaptive systems in order to maintain users in a positive mental state while learning. In the video games domain, Ghali et al. (Ghali et al., 2017) used adaptive systems to improve players' intuitive reasoning in a physics VR game by changing assistance strategies according to players' emotions.

Moreover, many researchers use intelligent agents in order to adapt their systems. For example, Dayong ye et al. (D. Ye et al., 2018) used an agent-based approach in order to adapt their system to alleviate the runtime quality management problem of distributed service-based systems. They claim that multi-agent systems are ideal to model service-based systems and then solve service adaptation problems. Also, Spencer Rugaber et al. (Rugaber et al., 2013) used intelligent agents to create a model-based technique for self-adaptation in game-playing agents. Additionally, Ben Abdesslem and Frasson (Ben Abdesslem et Frasson, 2017) used intelligent agents to adapt video games to players according to their cognitive and emotional states. In their work, they proposed to track and adapt in real-time the parameters of the video game according to players emotions. Similarly, Peña et al. (Peña et al., 2002) used intelligent agents to adapt their system to learners. The adaptation technique they used is focused on the didactic contents, navigation tools and navigation strategies of students' learning styles. Likewise, Doctor et al. (Doctor et al., 2014) used intelligent agents to monitor dementia patients living in their own homes. Adaptation rules are applied to facilitate short-term tuning of learned behaviors and long-term tracking of behavioral changes.

### **6.2.4 Brain Assessment**

Physiological sensing approaches are used in several studies in the brain assessment field. Electroencephalography (EEG) is one of these approaches which is used to detect and analyze emotional states. Since EEG is non-invasive and inexpensive, it is a simple and effective way to detect, analyze and evaluate emotions and mental states. In fact, researchers can analyze the brain's electrical activity by using EEG in order to understand the brain's inner working. Several

works in different fields relied on EEG in the brain assessment (Ben Abdesslem et Frasson, 2017; Jha et al., 2020).

In the field of serious games, Ghali et al. (Ghali et al., 2017) assessed participants' mental states by considering their engagement and frustration in a physics-related game using EEG. They have proposed to improve intuitive reasoning through help strategies based on these two emotional states.

Furthermore, in the field of learning, studies realized has shown that students' learning skills are improved when they are in a positive mental state. Considering this, Chaouachi et al. (Chaouachi et al., 2015a) developed a system that aims to help students in their learning by keeping them in a positive mental state. The study was based on students' engagement and workload extracted from EEG signals.

In order to assess emotions, some researchers used EEG data. There is a study, in the field of emotions' detection, designed to detect participants' valence (positive or negative emotion) in real-time while they were invited to watch different videos (Soleymani et al., 2014).

Considering the related works presented in this section, we propose the use of VR to create relaxing immersive environments as well as the use of Intelligent Agents with EEG as input in order to adapt these environments and optimize their effects to each person.

### **6.3 Our Approach**

Relaxing environments could have positive effects on individuals suffering from AD. In order to analyze and verify this effect, we propose to perform attention and memory tests measuring participants' cognitive performance before and after their immersion in relaxing environments. We propose to analyze AD patients' emotions during the pre-environment tests, the relaxing environments and once more during the post-environment tests. Figure 6.1 shows the architecture of our approach.

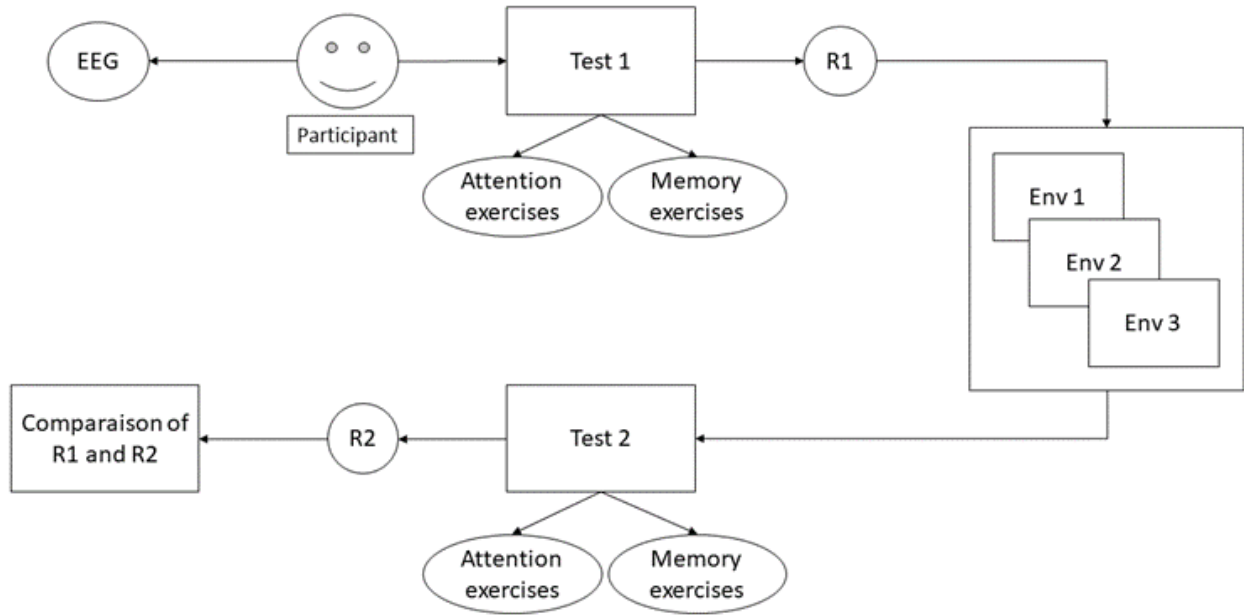


Figure 6.1 - Architecture of our approach.

For each environment, we evaluate the participant’s cognitive performance before their immersion in the environment (R1) as well as after the immersion (R2). Comparing R1 and R2 enables to assess the system’s effect on attention and memory performances.

We propose three VR relaxing systems inspired by the existing theories cited in section 6.2 for AD treatments (Virtual Train, Music Therapy and Savannah Theory) with different levels of intelligence: no intelligence for the Virtual Reality Train, some intelligence for the Music Therapy and more intelligence in Savannah. The following section provides a description of each system. Each environment is created with Unity 3D game engine which contains a built-in physics engine.

## 6.4 Virtual Reality Train

The environment described in the subsection 6.2.1 was not a virtual environment but a simulation of a real train station. A virtual environment could be a better solution to improve the emotional states of AD patients. The concept of immersion is important for isolating the patient from the real world, providing a sense of presence in the relaxing environment and reducing negative emotions. Thus, we designed and created an immersive VR travel environment. This environment

consists of a virtual train in which the participants are immersed, with a family casually sitting next to them (Figure 6.2).



Figure 6.2 - Screen capture of the virtual train.

The virtual train travels through three different natural environments. The first one involves a forest with trees and pacific animals. In the second one, the train travels through a snowy environment with mountains and pacific animals (Figure 6.3). The third and last environment consists of a sunny desert with a warm sun.



Figure 6.3 - Screen capture of the virtual train (second environment).

## 6.5 Adaptive Music Therapy

The Adaptive Music Therapy (AMT) system is composed of a Virtual Music Therapy environment and a Music Adaptation Agent.

### 6.5.1 Virtual Music Therapy

As mentioned in section 6.2.1, Music Therapy (MT) can positively influence psychological states and can help reduce negative emotions. Some studies have shown that VR can be beneficial for individuals suffering from SCD in addition to increasing its positive effect by isolating the participants from external distraction. With this in mind, we designed a Virtual MT therapeutic environment. This environment consists of a music theater in which the patient is immersed, placed in the center and facing the stage up front (see Figure 6.4).

The environment presents a series of eight songs in the following order: **Ave Maria** by Franz Schubert, **Eine Klein Nachtmusik** by Mozart, **Clair De Lune** by Debussy, **La Vie En Rose** by Edith Piaf, **Everyday** by Buddy Holly, **La Bamba** by Ritchie Valens, and finally **What A Wonderful World** by Louis Armstrong. These songs were meticulously selected based on music and psychology theories. For example, some songs were chosen due to their structural features; slow tempos and low pitches are generally associated with anxiety reduction (de la Torre-Luque et al., 2017). Other songs were selected because they had been popular during years coinciding with the participant's reminiscence bump; the interval between ages 10 and 30 where memories are generally more remembered (Rathbone et al., 2008).

A 30 seconds portion of the songs were chosen because they contained melodies with structural features associated with anxiety reduction. Each song is separated from the previous by red curtains which open and close as different songs are presented on stage. For each song, an appropriate selection of instruments is presented on stage, each instrument is animated with the music.

In addition, visual effects are presented above the instruments and the intensity of the light as well as their colors were chosen as a function of the emotional purpose of the song. Scenes were designed with specific shades of red, purple, blue, green and yellow, as they are suggested

to be the most pleasant and arousing hues (Valdez et Mehrabian, 1994). Figure 6.4 illustrates two songs with their respective selection of instruments and visual effects.

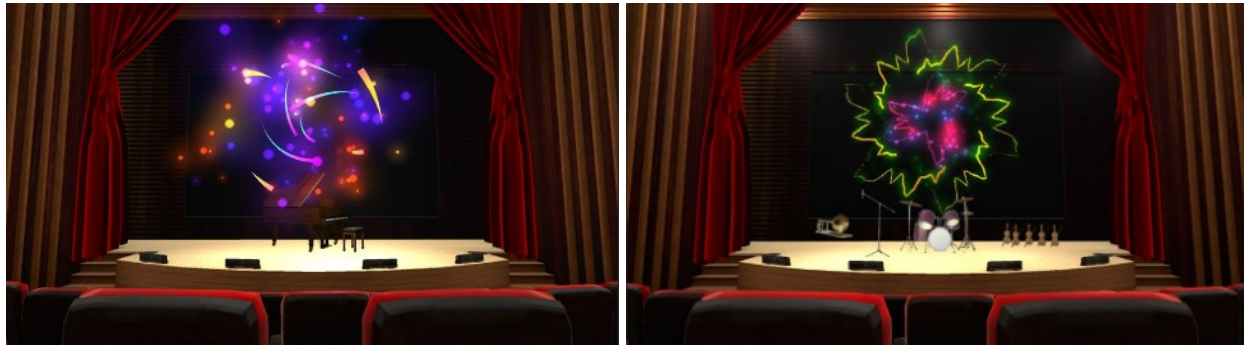


Figure 6.4 - Screen capture of Virtual Music Therapy environment for two different songs.

### 6.5.2 Music Adaptation Agent

Combining VR with MT could lead to a promising therapy; however, a static environment could have different impacts for each participant. Indeed, the intended effect of this environment is to increase emotional wellbeing. Consequently, it is important to adapt the environment to each participant in order to provide the most beneficial therapeutic experience for each individual.

In order to adapt the virtual MT environment to each participant, it is important to track and analyze the emotional impact of each song in real-time. Consequently, we created a Music Adaptation Agent able to record and analyze the users' emotions using Emotiv electroencephalograph (EEG) headset data in real-time. This agent tracks the emotions of the participants while they listen to the eight songs, analyzes the emotional impact of each song while they are playing, and calculates a score for each song according to emotion recordings. Subsequently, based on the scores, the agent detects the song which provokes the best emotional impact and adapts the virtual MT in such a way as to play this song once again for a longer period of time.

## 6.6 Intelligent Savannah Therapy

The Intelligent Savannah Therapy (IST) system is composed of a Savannah VR environment and a Neural Intelligent Agent.



### 6.6.1 Savannah VR

As mentioned in section 6.2.1, savannahs bring the feeling of tranquility and peace, especially for older adults suffering from SCD, which can help relax and reduce negative emotions. Furthermore, VR is beneficial also for SCD patients and it increases the positive effect of savannah, hence we propose to combine them to create Savannah VR (Dakoure et al., 2020).

Savannah VR is a therapeutic environment designed to relax SCD patients. In this environment, participants follow an avatar walking through a savannah. This environment requires only a virtual reality headset to control of the view angle. The dominant colors are warm, the animals are calm and their movement is slow. A soothing piano tune is played in the background at a volume low enough to appreciate the sound of each animal. Figure 6.5 illustrates screen captures of the environment.



Figure 6.5 - Screenshots of Savannah VR.

Participants follow a gazelle that moves along a path with breaking points. The gazelle moves slowly to avoid any possible nausea caused by movements within a virtual reality environment. Throughout the experience, the gazelle remains in front of the participant in such a way as to imitate a third-person view, which is less likely to cause motion sickness (Monteiro et al., 2018). At any moment, participants can look around in 360 degrees by rotating their heads.

Savannah VR could be more beneficial if we made it a dynamic environment which could be changed and adapted to each participant. Integrating an agent capable of adapting the environment could provide an optimized therapeutic experience to each individual.

In order to make the environment adaptable for each participant, we implemented functions that change the environment's parameters in real-time. For instance, one of the adjustable parameters is the color and intensity of the light, since light influences perception and decision-making (Song et Yamada, 2019).

### **6.6.2 Neural Agent**

In order to personalize the environment, we propose to use a Neural Agent (Ben Abdesslem et Frasson, 2017) able to modify the parameters of Savannah VR based on intervention rules triggering a biofeedback approach and more precisely a neurofeedback. Neurofeedback is a type of biofeedback that measures brain waves to produce a signal that can be used as feedback (Sherlin et al., 2011).

The Neural Agent consists of an intelligent agent which tracks the emotions of the participants and intervenes on Savannah VR accordingly. This agent has an intervention rules base which possesses multiple intervention rules. Giving the main emotion of the participant, the agent chooses a rule from this rules base and modifies the VR environment to adapt it to the participants. After each intervention, the agent tracks the emotional reactions of the participant to check whether the optimization of participants' emotion was a failure or a success and, if needed, intervenes again on the VR environment.

The Neural Agent is composed of two modules: "Analysis, decision and action" and "Rules base Manager" as well as two databases: "Decisions base" and "Rules base". Figure 6.6 illustrates the architecture of the Neural Agent and its interactions with the EEG module and Savannah VR. This architecture allows real-time interaction with the user in a neurofeedback loop.

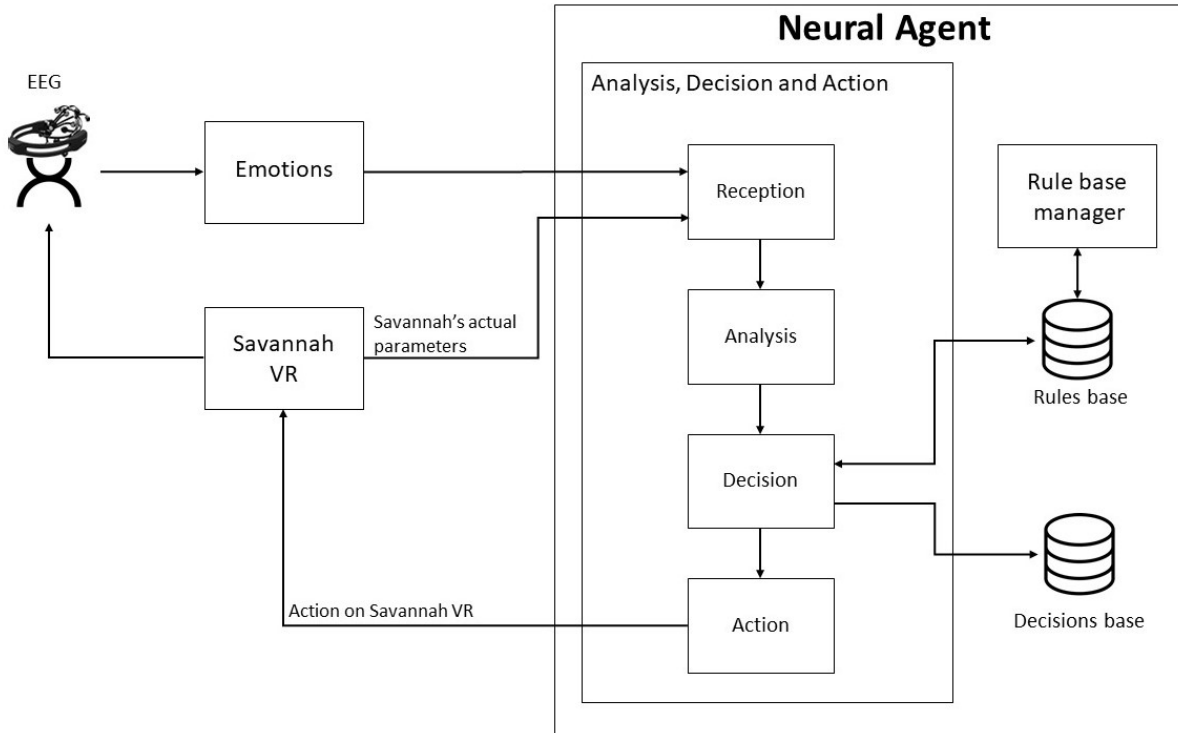


Figure 6.6 - Architecture of the Neural Agent.

The Analysis, Decision and Action module has four components which handle reception of data (emotions and information about the status of the environment) and data analysis in order to identify the main emotion and detect whether it corresponds to the expected emotion generated by the environment or not. After that, the module consults the rules base to extract the rule that can be applied and send the action to the environment and stores the decision in the “Decisions base”.

After each intervention, the agent observes the emotional reactions of the participant to check whether or not it does modify the emotional state as desired, and updates the weight of the intervention rule accordingly (increase the weight if it worked and decrease it if it doesn't).

The rules base manager module allows for the management of the intervention rules. The three main functionalities are adding, modifying, and deleting of an intervention rule. This module stores the rules in the “Rules base”.

## 6.7 Experiments

We conducted three experiments: one for each system. The details about the participants are the following:

- Virtual Reality Train: 19 participants (11 females) with subjective cognitive decline (SCD) and a mean age = 69.68 (SD= 5.49)
- Adaptive Music Therapy: 19 participants (13 females) with SCD and a mean age = 72,26 (SD = 5,82)
- Intelligent Savannah Therapy: 19 participants (12 females) with SCD and a mean age = 71 (SD = 8,39)

All experiments were conducted at the *Institut Universitaire de Geriatrie de Montréal* Research Center (CRIUGM) during the day.

All participants attended an eligibility session (lasting one hour) in which we ensured their eligibility. Our eligibility criteria were the following:

- Older than aged 60 of age
- Francophone
- Normal or correct-to-normal vision
- Normal hearing
- Met the Consortium for the Early Identification of Alzheimer’s Disease – Quebec (CIMA-Q) criteria for SCD:
  - Presence of a complaint defined as a positive answer to the following statements: “my memory is not as good as it used to be” “and it worries me”
  - MoCA 20-30
  - No impairment on the logical memory scale based on the education-adjusted CIMA-Q cut-off scores.

During the eligibility session, participants were provided with oral and written descriptions of the study and invited to sign a consent form. The session then included a series of clinical tests necessary to confirm diagnosis and characterize participants. If the participants were eligible, they were invited to take part in the experiment.

During the experimental session, participants started by filling pre-session forms. Then we equipped them with an Emotiv EPOC+ EEG headset and invited them to solve the attention and memory exercises described below. Following these exercises, participants were equipped with a FOVE VR headset and one of the relaxing systems presented in the previous sections was launched. Next, participants completed different variants of the same attention and memory exercises. Finally, the experimental session came to an end after filling out the post-session forms. Figure 6.7 shows the steps of the experimental process.

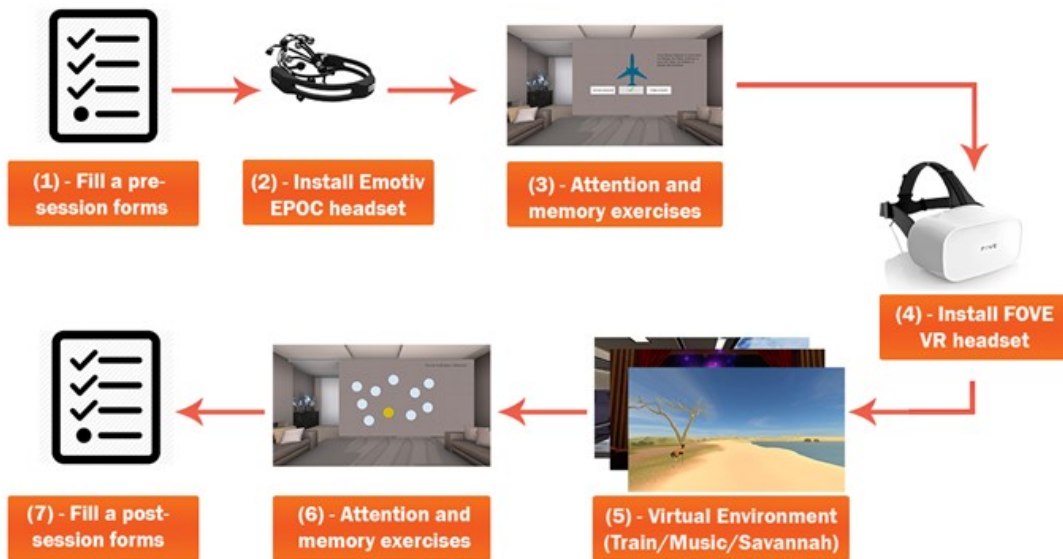


Figure 6.7 - Process of the experiments.

## 6.7.1 Attention Exercises

### 6.7.1.1 Exercise 1

In this exercise, we present a series of 5 numbers in auditory form, then a numerical pad is displayed, and the participant is asked to repeat the same sequence; then we hide the pad and

present another sound sequence of 3 numbers and the participant is asked to report the sequence in the reverse order.

#### 6.7.1.2 Exercise 2

In the second attention exercise, we present a sound sequence of different letters at a rate of one per second and the participant must click the space bar each time they hear the letter “A”.

#### 6.7.1.3 Exercise 3

The third attention exercise is about naming different objects. For every object, we show an image for 4 seconds, hide it, and then show four letters. Then, the participant is asked to select the first letter of the object’s name. Figure 6.8 illustrates how the participants see an image and then four letters as a suggestion.

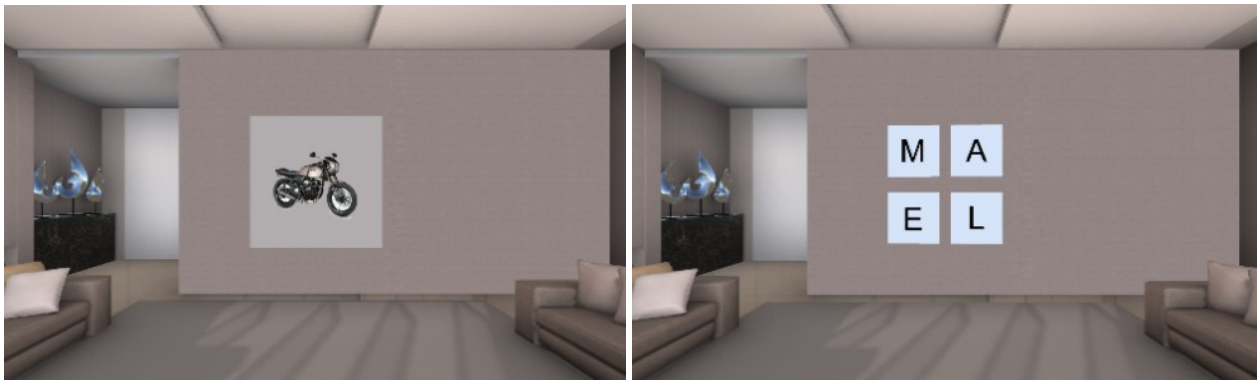


Figure 6.8 -. Screenshot of attention exercise 3.

### 6.7.2 Memory Exercises

#### 6.7.2.1 Exercise 4

In this exercise the participants are asked to memorize a series of different objects visually or aurally. Then, we present a series of objects and the participants are asked to select whether they saw the object, heard its name, or whether it was never presented. Figure 6.9 illustrates a case where the participant correctly answered that they saw the image of the dog.

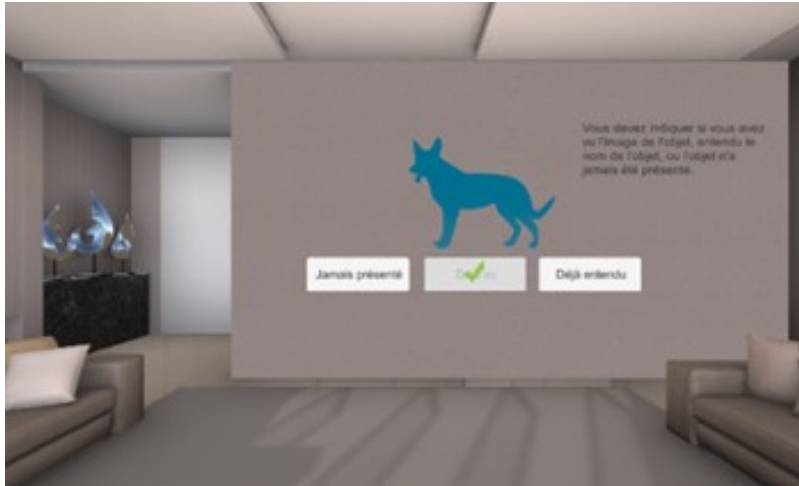


Figure 6.9 - Screenshot of exercise 4.

### 6.7.2.2 Exercise 5

In the second memory exercise, we present ten circles, then a series of circles are highlighted one by one in order to create a sequence. The participants are then asked to reproduce the same sequence. We present two sequences with two different levels of difficulty.

### 6.7.2.3 Exercise 6

In the third and final memory exercise, we present a set of three pictures for a short period of time. Then, we present four sets of three pictures and the participant is asked to identify which set was presented. Figure 6.10 shows how we present the pictures and a case where the participant chooses the correct answer.

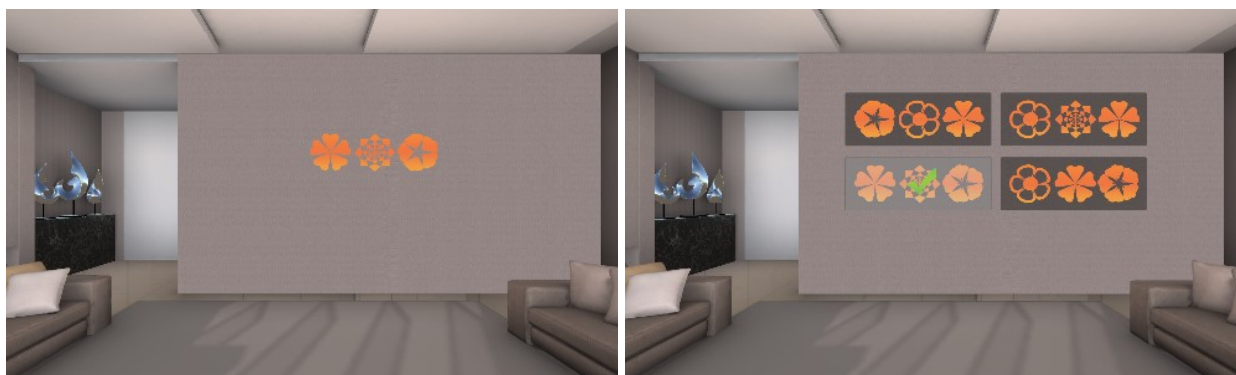


Figure 6.10 - Screenshot of exercise 6.

### 6.7.3 Brain Assessment using EEG measures

In order to track and analyze participants' emotions, we used Emotiv Epoc+ EEG headset technology. The headset contains 14 electrodes spatially organized according to the International 10-20 system, moist with a saline solution. The electrodes are placed at antero-frontal (AF3, AF4, F3, F4, F7, F8), fronto-central (FC5, FC6), parietal (P7, P8), temporal (T7, T8) and occipital (O1, O2) regions with two additional reference sensors placed behind the ears. The detailed position of the measured regions is shown in Figure 6.11.

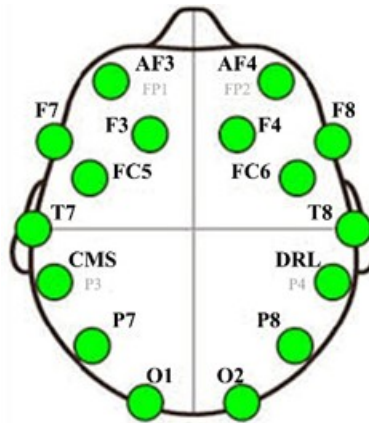


Figure 6.11 - Emotiv headset sensors placement.

The system uses internal algorithms to measure the following mental states: meditation, frustration, engagement, excitement and valence. They were used to assess the effect of the Virtual Reality Train, the Adaptive Music Therapy and Intelligent Savannah Therapy on the emotions of participants and were used as input for the Music Adaptation Agent and The Neural Agent.

Even though we don't have access to Emotiv system proprietary algorithms to infer these mental states, several studies have established the reliability of the output (Aspinall et al., 2015).

## 6.8 Results and discussion

### 6.8.1 Therapeutic Train

In order to verify our first hypothesis which is: **relaxing environments reduce negative emotions**, we proceeded by analyzing the participants' negative emotions before and after the VR Train.



Results show that the mean frustration of participants before the VR Train was 0.71 (minimum 0.41 and maximum 0.96). The participants' mean frustration during the VR Train was 0.51 (minimum 0.24 and maximum 0.94). After the VR Train, the mean frustration was 0.53 (minimum 0.17 and maximum 0.79). Figure 6.12 shows a boxplot of the mean frustration before, during and after the travel in the VR Train.

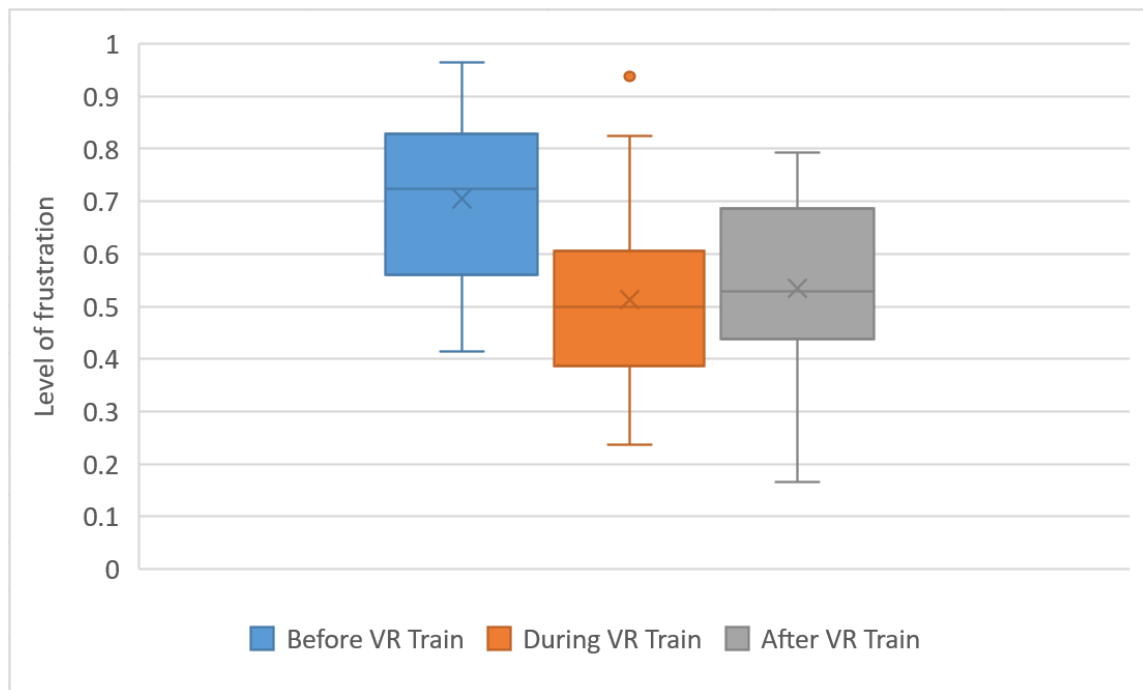


Figure 6.12 - Participants' level of frustration before, during and after VR Train.

In addition, we conducted a repeated measure ANOVA with participants' frustration level as dependent variable. Results revealed a significant decrease of the frustration during the VR Train and the effect was still observed after the VR Train immersion ( $p=0.0011$  and  $F=7.7218$ ). Table 6.1 details the ANOVA results and shows that the mean frustration level decreased from 0.705 to 0.513 and kept the positive effect after the VR train by increasing only to 0.534.

Thus, the frustration decreased when the participants were in the VR Train and the positive effect on frustration was preserved following the immersion.

Table 6.1 - ANOVA Mean Frustration (VR Train).

	Before VR Train	During VR Train	After VR Train
Mean	0.705	0.513	0.534
SD	0.148	0.186	0.158
N	19		
F	7.7218		
P	0.0011		

In order to verify our second hypothesis which is: **relaxing environments improve attention and memory performance**, we started by comparing the performance improvement of the attention and memory exercises by calculating the average mean performance of all participants before and after the VR train. Figure 6.13 shows the obtained results in which we can notice a clear difference between the improvement of performance on the attention exercises versus the memory exercises.

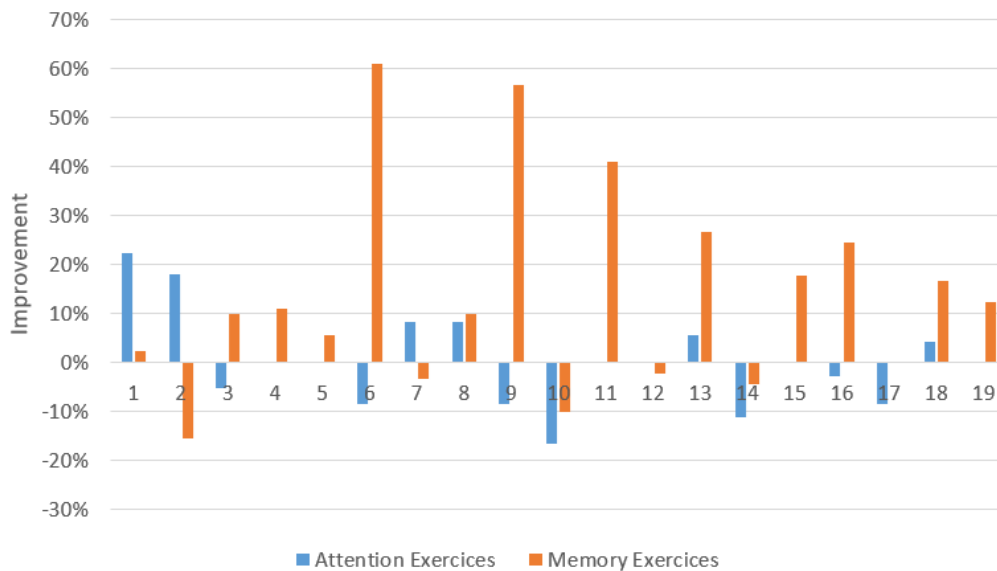


Figure 6.13 - Performance improvement for attention and memory exercises (VR Train).

These results show a clear increase in memory performance following the VR Train and in some cases an improvement in attention abilities.

In order to have more detailed results, we also compared the participants' performances before and after the VR train for each exercise. The mean improvement results of each exercise are shown in table 6.2.

Table 6.2 - Mean performance improvement (VR Train).

	Exercise 1	Exercise 2	Exercise 3	Exercise 4	Exercise 5	Exercise 6
Mean Improvement	-6.58%	0.48%	7.02%	10.53%	<b>20%</b>	10.53%

The biggest performance improvement is observed in exercise 5 and corresponds to a mean 20% improvement. In addition, we performed a paired t-test statistical test with participants' scores for exercise 5 before and after the VR Train as parameters. The obtained result is  $t = 2.293$  and  $p = 0.017$ , this result is significant at  $p < 0.05$ .

### 6.8.2 Adaptive Music Therapy

For the second system, we also analyzed the negative emotions before and after Adaptive Music Therapy. We analyzed the level of frustration of the participants and results show that the mean frustration before AMT was 0.691 (minimum 0.377 and maximum 1.0). Their level of frustration during AMT was 0.457 (minimum 0.213 and maximum 0.824). After AMT, their level of frustration was 0.517 (minimum 0.238 and maximum 0.927). Figure 6.14 shows a boxplot of the mean frustration before, during and after the Adaptive Music Therapy immersion.

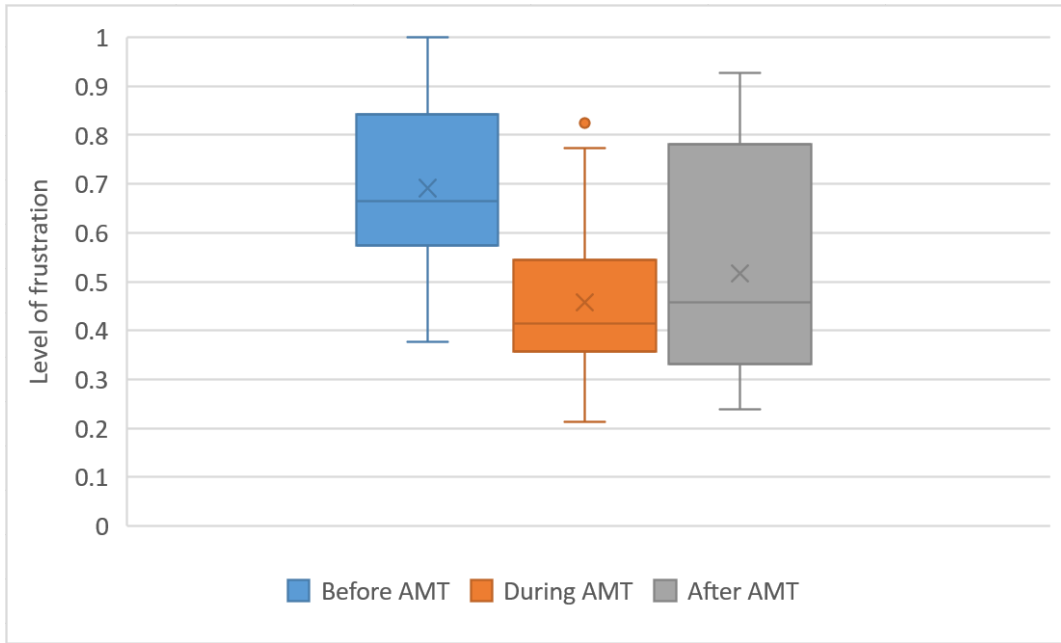


Figure 6.14 - Participants' level of frustration before, during and after AMT.

In addition, we conducted a repeated measure ANOVA with participants' frustration level as dependent variable. Results revealed a decrease of the frustration during AMT and the effect was still observed after the immersion ( $p=0.0011$  and  $F= 8.26316$ ). Table 6.3 details the ANOVA results and shows that the mean frustration level decreased from 0.691 to 0.457, and that the positive effect was kept after AMT and increased only to 0.517.

Table 6.3 - ANOVA Mean Frustration (AMT).

	Before VR AMT	During VR AMT	After VR AMT
Mean	0.691	0.457	0.517
SD	0.184	0.150	0.212
N	19		
F	8.2631		
P	0.0011		

In order to verify our second hypothesis for the second system, we compared the improvement of attention and memory exercises by calculating the average mean performance of all participants before and after AMT. Figure 6.15 shows the obtained results.

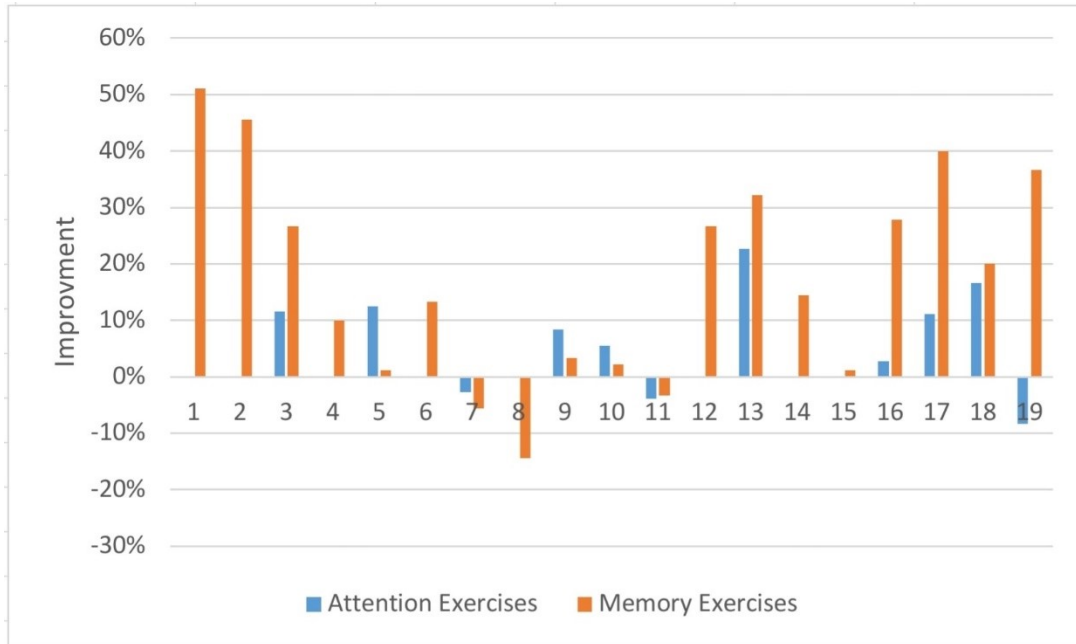


Figure 6.15 - Performance improvement for attention and memory exercises (AMT).

These results show a difference between the improvements of performance on the attention exercises versus the memory exercises. We notice a clear increase of memory performance after AMT for most participants and an increase in attention performances for nearly half the participants.

We also compared the performance of the participants before and after AMT for each exercise. The mean improvement results of each exercise are shown in table 6.4.

Table 6.4 - Mean performance improvement (AMT).

	Exercise 1	Exercise 2	Exercise 3	Exercise 4	Exercise 5	Exercise 6
Mean Improvement	6.58%	1.91%	3.51%	6.14%	8.95%	<b>36.84%</b>

The most noticeable improvement is observed in exercise 6, with a mean improvement of 36,84%. In addition, we performed a paired t-test statistical test with participants' scores for exercise 6 before and after the AMT as parameters. The obtained result is  $t = 3.440$  and  $p = 0.0029$ , this result is significant at  $p < 0.05$ .

As we mentioned in section 6.5.2, the Music Adaptation Agent intelligently adapts the environment by choosing the most efficient song as a function of the participant's emotional response. Therefore, we analyzed the mean frustration during AMT before and after the agent's adaptation. Results showed that the general mean frustration for all participants before the agent's adaptation was 0.48 (minimum 0.29 and maximum 0.84) and dropped to 0.41 (minimum 0.18 and maximum 0.77) after the agent's adaptation. Individual results are shown in figure 6.16.

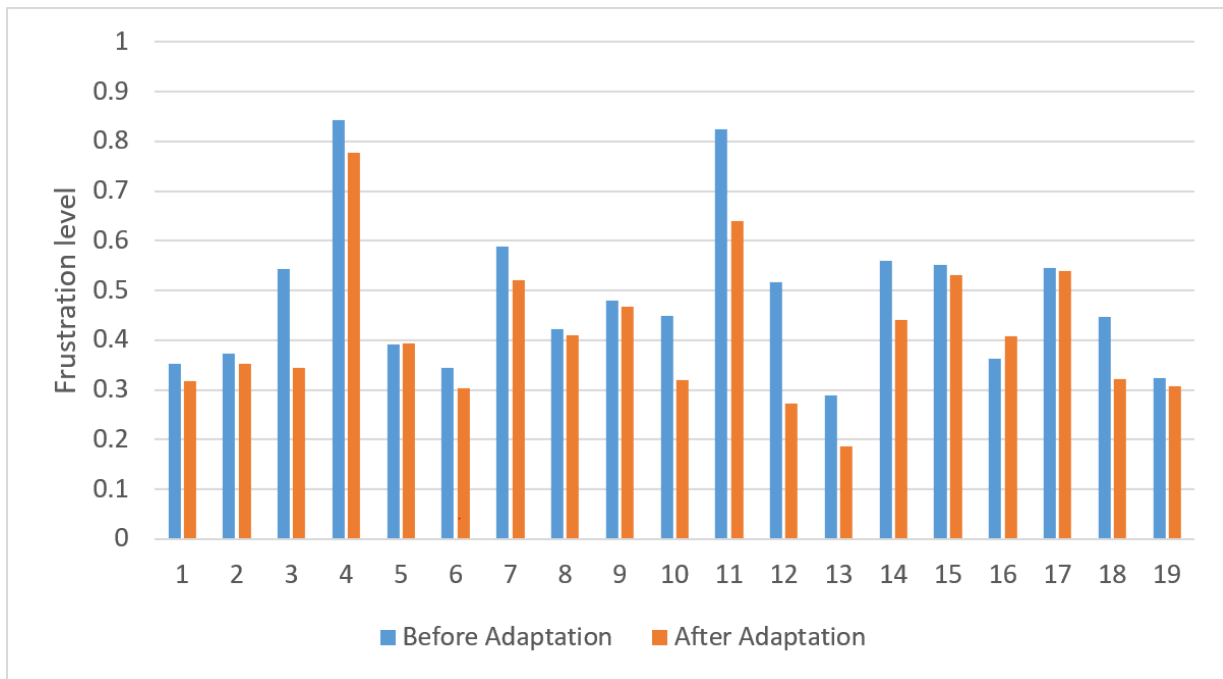


Figure 6.16 - Histogram of mean frustration level before and after agent's adaptation in AMT.

We can observe a frustration decrease after the adaptation for most participants, except for two; only participants 5 and 16 failed to show the effect.

In order to further analyze and support these results, we conducted a t-test for 2 dependent means where the parameters were the mean frustration before and after the adaptation. The obtained results are  $t = -2.2082$  and  $p = 0.040$ . This result is significant at  $p < 0.05$ .

These results support our third hypothesis which is: **intelligent agents can adapt relaxing environments in order to optimize its effect**, and shows that it is possible to intelligently optimize the environment in order to reduce negative emotions.

### 6.8.3 Intelligent Savannah Therapy

In addition to the results obtained in the previous section, and in order to support our first hypothesis, we analyzed the negative emotions before and after the Intelligent Savannah Therapy. We analyzed the participants' level of frustration and results show that the mean frustration of participants before IST was 0.68, (minimum 0.24 and maximum 0.98). The participants' mean frustration during IST was 0.57 (minimum 0.31 and maximum 0.88). After IST, the mean frustration was 0.55 (minimum 0.28 and maximum 0.91). Figure 6.17 shows a boxplot of the mean frustration before, during and after IST.

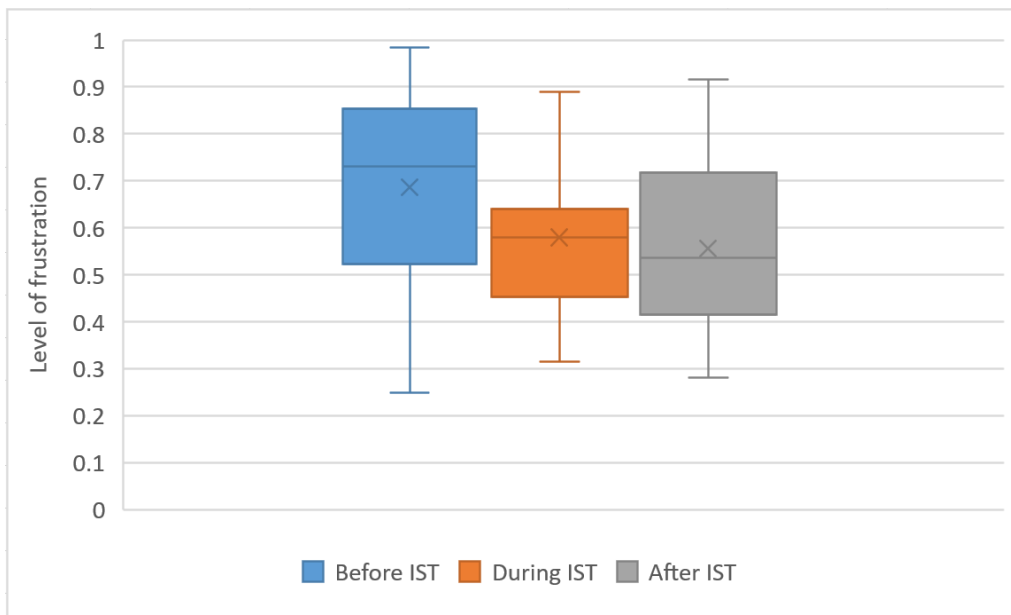


Figure 6.17 - Participants' level of frustration before, during and after IST.

In addition, we conducted a repeated measure ANOVA with participants' frustration level as dependent variable. Results revealed a decrease of the frustration during IST and the effect was still observed after the immersion ( $p= 0.0345$  and  $F= 3.7018$ ). Table 6.5 details the ANOVA results and shows that the mean frustration level decreased from 0.685 to 0.579 and further decreased after IST to 0.555.

Table 6.5 - ANOVA Mean Frustration (IST).

	Before IST	During IST	After IST
Mean	0.685	0.579	0.555
SD	0.210	0.162	0.176
N	19		
F	3.7018		
P	0.0345		

In order to support the results obtained in sections 6.8.1 and 6.8.2 for our second hypothesis, we compared the improvement of attention and memory exercises by calculating the average mean performance of all participants before and after IST. Figure 6.18 shows the obtained results.

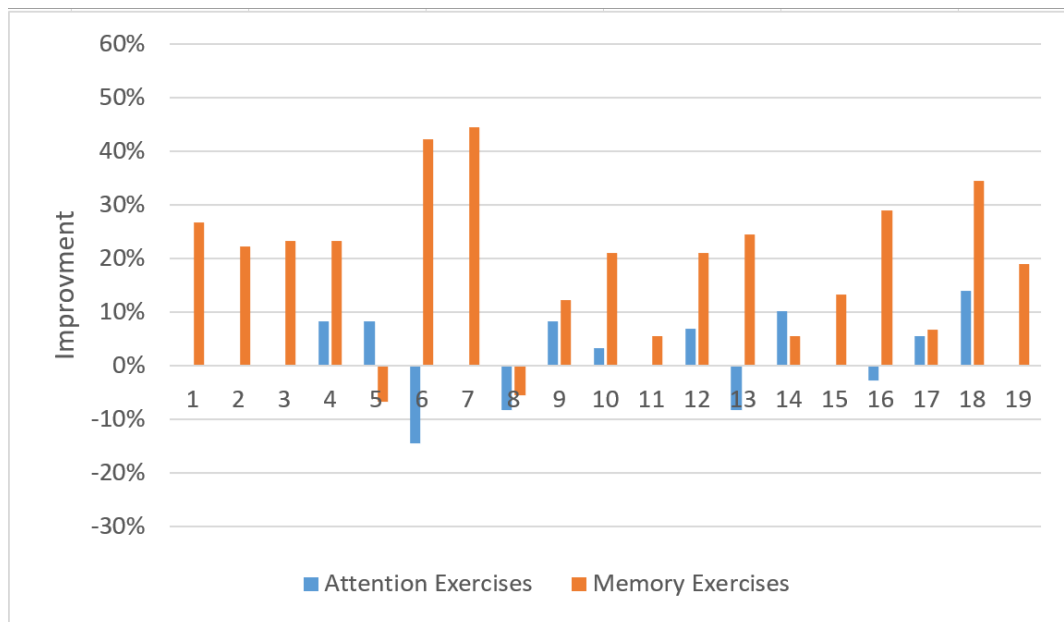


Figure 6.18 - Performance improvement for attention and memory exercises (IST).



These results show a clear increase of memory performance after IST for most participants (17) and an increase in attention performance for almost half the participants (8).

We also compared the performance of the participants before and after IST for each exercise. The mean improvement results of each exercise are shown in table 6.6.

Table 6.6 - Mean performance improvement (IST).

	Exercise 1	Exercise 2	Exercise 3	Exercise 4	Exercise 5	Exercise 6
Mean Improvement	-1.32%	0.96%	5.26%	6.14%	16.84%	<b>34.21%</b>

The largest improvement is observed in exercise 6 by 34.21%. In addition, we performed a paired t-test statistical test with participants score of exercise 6 before and after the IST as parameters. The obtained result is  $t = 3.9804$  and  $p = 0.0008$ . This result is significant at  $p < 0.05$ .

The performance improvement for exercise 5 was also considerable, with a mean of 16.84%. This led us to perform another paired t-test with participants score of exercise 5 before and after the IST as parameters. The obtained result is  $t = 2.9682$  and  $p = 0.0082$ , which is significant at  $p < 0.05$ .

As mentioned, in section 6.6.2, the Neural Agent adapts the environment to personalize its effect to each participant. Thus, in order to confirm our third hypothesis and support the results found in section 6.8.2, we analyzed the mean frustration level of each participant before and after the agent's adaptation and personalization of the environment. The Neural Agent intervenes in the environment and then checks whether its changes modify the participant's emotion in the expected way. We analyzed the mean frustration before and after each time the agent intervened and mark the intervention as a success.

Results show that the mean frustration for all participants before the agent's successful interventions was 0.57 (minimum 0.31 and maximum 0.88) and dropped to 0.53 (minimum 0.28 and maximum 0.81) after the agent's adaptation. Individual results are shown in figure 6.19.

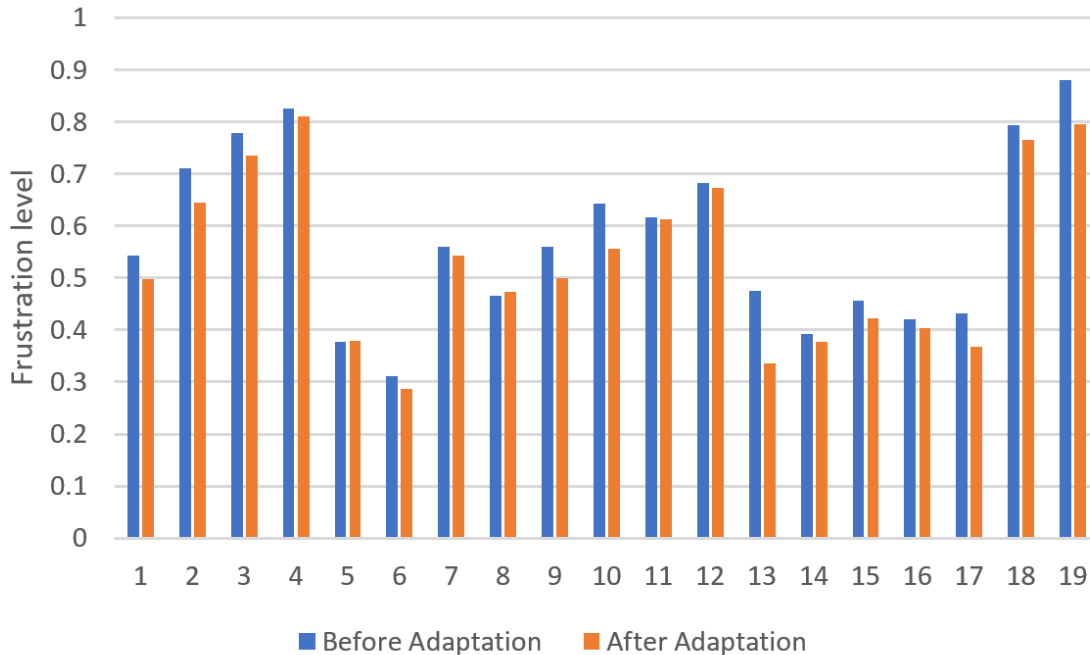


Figure 6.19 - Histogram of mean frustration level before and after agent’s adaptation in IST.

We can observe a frustration decrease after the adaptation for most participants except for two. Only participants 5 and 8 failed to show the effect.

In order to support these results, we conducted a t-test for 2 dependent means where the parameters were the mean frustration before and after the agent’s intervention. The obtained results are  $t = -4.5815$  and  $p = 0.0002$ , which is significant at  $p < 0.05$ . These results confirm that we can intelligently adapt the relaxing environment in order to optimize its effect.

### 6.8.4 Overall Results

The results presented in the previous subsection support our first hypothesis and show that our three relaxing systems successfully reduce participants’ frustration. This effect varies with the level of intelligence of the system. In table 6.7, we present the participants’ mean frustration before, during and after the three relaxing systems. We note that for our three systems, the frustration drops during all systems, but the effect of relaxation stays longer with more adaptation and more intelligence. The system with the Neural Agent is the only one which makes the effect of relaxation persist longer even after the immersion and does not exceed the initial

level of frustration. These results support our third hypothesis and show that intelligent agents can optimize the effect of relaxing systems.

Table 6.7 - Comparison of mean frustration.

	Before	During	After
VR Train	0.705	0.513	0.534
AMT	0.691	0.457	0.517
IST	0.685	<b>0.579</b>	<b>0.555</b>

In addition, the results presented in the previous subsection, support our second hypothesis, and show that our three systems improve participants' memory performance and in some cases attention performance too. In table 6.8, we present a comparison of the mean performance improvement for memory exercises. We note that for our three systems, the memory performance increases, but the level of improvement is more important when the system is more intelligent. The largest mean improvement is observed in the system with the Neural Agent. This therefore supports our third hypothesis and shows that intelligent agents are able to optimize the effect of our therapeutic systems.

Table 6.8 - Comparison of mean memory performance improvement.

	Exercise 4	Exercise 5	Exercise 6	Mean
VR Train	10.53%	20%	10.53%	13.69%
AMT	6.14%	8.95%	36.84%	17.31%
IST	6.14%	16.84%	34.21%	<b>19.06%</b>

### 6.8.5 Work Limitations

The results presented in the previous section show that our approach has a great potential to reduce negative emotions and improve memory performances. However, our work has some limitations; First, we could not perform experiments on more than 19 participants per system. Future lab research will require additional experiments in order to verify the effect on our

environments are a larger scale and consequently confirm the obtained effect. Second, our approach requires the use of two headsets (EEG and VR headsets) in order to collect experiments' data and some participants were not very comfortable using both headsets for a long period of time. This could explain the decrease of performance of some participants.

In terms of the environments themselves, each participant had a different preference. Although most of the participants appreciated the environments, which led to a general positive effect detailed in the previous section, their effects were not unanimous, as some participants did not benefit from the environment's therapeutic effect as much as others. For example, in Train VR system, some participants experienced motion sickness problems. For AMT, some songs could have triggered the recollection of negative memories, ultimately negatively influencing their emotional state. Finally, for IST, some participants did not enjoy or were uncomfortable in the presence of animals. By influencing emotional states, all of these factors could have contributed to a decrease in the participants' performance.

In addition, we also note that this approach would not be feasible for blind individuals since the VR headset is required to the immersive effect. However, some two of our environments, namely Train VR and IST, could work for deaf individuals, but the result could be different due to the absence of relaxing background music for Train VR and Volume/Music controlled by the agent in IST.

## **6.9 Conclusions and Future Works**

In this paper, we presented a novel approach which uses Adaptive Intelligent Agents in order to optimize the calming effects of relaxing VR environments on SCD patients. We presented three systems with different levels of intelligent adaptation which aim to relax SCD patients and subsequently improve their memory performance. We performed experiments for each system. Results showed that the three relaxing systems, Virtual Train, Adaptive Music Therapy and Intelligent Savannah Therapy, reduce participants' negative emotions. In addition, these three environments improve memory performances. We note that, the more intelligence we have in the system, the better the system is at reducing negative emotions and improving memory performances. We conclude that intelligent agents can successfully adapt these relaxing

environments in order to optimizing the environment's benefit for each participant. As future works, we aim to further push the level of intelligence by creating a personal intelligent agent capable of learning about each participant for more personalized and optimized adaptation effects.

## **Acknowledgments**

We thank Marc Cuesta, Sylvie Belleville, Caroline Dakoure and Marwa Boukadida for their contributions to this work.

We acknowledge NSERC-CRD (National Science and Engineering Research Council), Prompt and Beam Me Up Labs for funding this work.



## **Partie III : Système de contrôle cognitif Intelligent**





## Chapitre 7 - Personnalisation de la thérapie pour la maladie d'Alzheimer

Dans ce chapitre, nous présentons une approche de personnalisation des environnements thérapeutiques de la maladie d'Alzheimer à l'aide d'un système de contrôle cognitif intelligent. Les patients atteints de la maladie d'Alzheimer expérimentent beaucoup d'émotions négatives et les EVs relaxants peuvent être une solution qui diminue l'intensité de ces émotions. L'effet des EVs relaxants change d'un patient à un autre, c'est la raison pour laquelle nous avons utilisé un *Agent Neural* (présenté dans la partie II) qui adapte les EVs en intervenant sur leurs paramètres. Ces interventions déclenchent des réactions émotionnelles chez ces patients qui peuvent être positives ou négatives. Cependant, l'*Agent Neural* ne réussit pas toujours à affecter positivement les patients à travers les interventions.

Il est important de maximiser le nombre d'interventions qui ont un effet positif pour chaque patient en réduisant l'intensité de ses émotions négatives. Pour ce faire, il faut apprendre des interventions de l'*Agent Neural* et des réactions émotionnelles suite à chaque intervention afin de la modifier ou de créer une nouvelle intervention.

Les hypothèses de l'étude sont les suivantes :

- Il est possible d'apprendre des interventions de l'*Agent Neural* et des réactions émotionnelles du patient dans le but de générer de nouvelles règles d'interventions.
- Il est possible de prédire l'impact des nouvelles règles générées sur l'état émotionnel du patient.

Pour vérifier les hypothèses de cette étude, nous proposons de créer un **Agent Limbique** qui complète l'Agent *Neural* afin de maximiser le nombre des interventions positives. Cet agent est appelé ainsi car il reproduit le comportement d'un système limbique humain idéal, c'est à dire qui réduit par lui-même les émotions négatives et leurs impacts cognitifs. En le combinant avec le *Module de mesures* et l'Agent *Neural*, il nous permet de créer un **SLD**, qui sera détaillé dans le chapitre suivant. L'Agent *Limbique* analyse les adaptations de l'EV et les réactions émotionnelles du patient afin de modifier les interventions de l'Agent *Neural* en modifiant des règles existantes ou bien en créant de nouvelles règles d'intervention. Cet agent apprend de l'historique des interventions et leurs impacts afin de créer un modèle capable de prédire l'impact d'une nouvelle règle d'intervention sur l'état émotionnel et mental du patient.

Afin de créer l'Agent *Limbique*, nous utilisons les données recueillies durant les expériences réalisées avec l'environnement relaxant *Savannah VR*. Durant ces expériences, l'Agent *Neural* a réalisé des interventions afin d'adapter l'EV, et plusieurs parmi ces interventions n'ont pas fonctionné, d'où l'intérêt de concevoir l'Agent *Limbique*.

Nous avons conçu l'Agent *Limbique*, et les résultats préliminaire montrent qu'il est capable d'analyser les règles qui fonctionnent pour certains patients mais ne fonctionnent pas pour d'autres. Par la suite, cet agent, modifie les poids attribués aux règles afin de les inhiber ou bien maximiser leur utilisation. Les résultats montrent aussi que l'Agent *Limbique* est capable de générer une nouvelle règle d'intervention. De plus, nous avons entraîné un modèle en utilisant l'apprentissage machine afin de prédire l'impact d'une règle d'intervention. Les résultats montrent que ce modèle est capable de prédire l'impact des règles d'intervention. L'efficacité de ce modèle peut être améliorée en réalisant plus d'expérimentations afin de collecter plus de données pour l'entraînement.

Le reste de ce chapitre est constitué de l'article intitulé « Toward personalizing Alzheimer's Disease Therapy using an Intelligent Cognitive Control System » soumis dans la conférence « Novelties In Intelligent Digital Systems (NIDS) » en 2021. Mes contributions dans cet article consistent à : analyse des résultats de l'Agent *Neural*, la création de l'Agent *Limbique*, traitement

de données, et l'écriture de l'article. Ce travail a été dirigé, révisé, corrigé, et financé par mon directeur de recherche Claude Frasson.



# Toward personalizing Alzheimer's Disease Therapy using an Intelligent Cognitive Control System

Hamdi Ben Abdesslem and Claude Frasson

Submitted to: 1st International Conference On Novelities In Intelligent Digital Systems (NIDS 2021)

## Abstract

Subjective cognitive decline is an early state of Alzheimer's Disease which affects almost 10 million people every year. It results from negative emotions such as frustration which are more present in healthy adults. For this reason, our work focuses on relaxing subjective cognitive decline patients using virtual reality environments to improve their memory performance. We proposed in our previous work a neurofeedback approach which adapts the virtual environment to each patient according to their emotions using a Neural Agent. We found that the Neural Agent can adapt the environment to each participant but have limitations. This work is a continuation of our approach in which we propose a *Limbic Agent* able to monitor the interactions between the Neural Agent and patients' emotional reactions, learn from these interactions, and modify the Neural Agent in order to enhance the adaptation to each patient with an Intelligent Cognitive Control System. Our goal is to create a system able to support the Limbic System which is the main area in charge of controlling emotions and creating memory in the human brain. We used

data collected from our previous work to train the Limbic Agent and results showed that the agent is capable of modifying the weight of existing rules, generating new intervention rules, and predicting if they will work or not.

### **Keywords**

EEG, Virtual Reality, Limbic System, Intelligent Agent, Neurofeedback, Alzheimer's Disease, Intelligent Cognitive Control System

## **7.1 Introduction**

Alzheimer's disease (AD) is one of the most crucial disease of our century affecting millions every year. AD has a direct negative effect on memory and cognitive functions which trigger a negative effect on the emotions. Negative emotions such as anxiety, frustration, and apathy are common in AD patients which reduce their wellbeing significantly (Benoit et al., 1999b). This disease affects more commonly people aged 65 and older with a vulnerability increasing with age (Boyle et al., 2019). Alzheimer's disease is progressive, and its earliest phase is characterized by a state of subjective cognitive decline (SCD).

Which makes this disease important is that no cure has yet been found, although, some pharmacological interventions may reduce the symptoms. Considering that AD patients experience negative emotions, non-pharmacological treatments which aim to reduce these negative emotions could be a good alternative to reduce AD symptoms and promotes cognitive performance (Ben Abdesslem et al., 2020; Byrns et al., 2020a).

Virtual Reality (VR) has proven to be efficient in treating certain phobias, for instance, spider's phobia (Horváthová et Siládi, 2016), and can be used to calm negative emotions. The immersion provided by VR gives a feeling of safety and encourages imagination. In addition, the patient is isolated from external distraction which increases the effect of the environment presented in VR and reduces the possible negative reactions caused by external factors. , electroencephalography (EEG) devices help tracking the emotional states of AD patients interacting with VR environment.

In a previous work (Ben Abdesslem et al., 2021), we presented a novel approach which uses VR to relax SCD patients, reduce their negative emotions and improve their cognitive performance. We proposed also to use a Neural Agent (Ben Abdesslem et Frasson, 2017) which adapts the relaxing VR environment and optimize its effect. We conducted experiments and results showed that the approach effectively reduces negative emotions and improve memory performance. In addition, results showed that the Neural Agent is able to optimize the relaxing environment in order to personalize it for each participant by triggering intervention rules on the environment according to patients' emotions.

we also found that the modification performed by the Neural Agent does not always work as intended, some intervention rules leading to another emotional state not targeted by the rule.

In this work, we aim to verify the following hypotheses: H1: **it is possible to learn from the interactions between the neural agent and the patient's emotional reactions in order to generate new intervention rules** and H2: **it is possible to predict the impact of the new generated rules on the patient's emotions.**

The rest of this paper is organized as follows. In section 7.2, we present an outline of the related works. Section 7.3 presents our approach. In section 7.4 we detail the experiments. Finally, in section 7.5 we present and discuss the results.

## **7.2 Related Works**

### **7.2.1 Brain Assessment**

Due to its low cost and non-invasiveness, EEG represents a good equipment for brain assessment. In the field of emotion recognition, Liu et al. (Liu et al., 2020), proposed a multi-level features guided capsule network for multi-channel emotion recognition based on EEG signals. Their framework can identify intrinsic relationship among various EEG channels effectively. Moreover, Zhu et al. (Zhu et al., 2020), analyzed EEG signals in order to explore social emotion perception and emotion classification. They designed a classifier based on convolutional neural network for social emotion classification using EEG. While in the field of psychology, Li et al. (Li et al., 2020), proposed a method for quantitative evaluation of people's Big Five personality using EEG. They

developed machine learning models in order to predict user's personality based on their EEG signals while presented to emotional video clips. In the AD and mild cognitive impairment (MCI) detection, Oltu et al., (Oltu et al., 2021) developed a machine learning approach that discriminate AD, MCI and healthy control individuals using EEG signals.

### **7.2.2 Intelligent Agents and adaptation**

Adaptative systems are often used to personalize experiences for each user. In the field of video games, Ben Abdesslem and Frasson (Ben Abdesslem et Frasson, 2017) proposed to adapt a video game in real-time. Using intelligent agents, they track in real-time the player's cognitive and emotional states, then adapt the video game's parameters according to these states. Furthermore, Spencer Rugaber et al. (Rugaber et al., 2013) created a model-based technique for self-adaptation in game-playing agents using intelligent agents. Doctor et al. (Doctor et al., 2014) applied intelligent agents in the field of neuroscience. They used adaptation rules to facilitate learned behaviors' tuning and behavioral changes' tracking in the monitoring of dementia patients living in their own homes. Peña et al. (Peña et al., 2002) used intelligent agents in the field of learning. They adapted their system to learners by using an adaptation technique which focuses on the navigation tools, navigation strategies and the didactic contents.

### **7.2.3 Virtual Reality and relaxing environments**

Recently, VR started gaining interest in many fields due to its remarkable advantages. Its main characteristics are immersion, sense of presence, and interactivity (Walsh et Pawlowski, 2002). In fact, VR tricks the users' mind and makes them believe they are in a real world and thus promotes their performance (Biocca et Levy, 1995). This technology is applied in the field of psychology. Dana et al. (Horváthová et Siládi, 2016) used it to as treatments for certain types of phobias. They created virtual environments in order to simulate situations and thus help patients face their fear. Furthermore, Lorenzo G. et al. (Lorenzo et al., 2016) used VR in order to enhance the emotional skills of children diagnosed with autism spectrum disorders. Moreover, Coyle et al. (Coyle et al., 2015), used it in the cognitive training. In fact, they assessed the efficacy of computerized cognitive training and virtual reality cognitive training programs for individuals living with MCI or dementia.



## 7.3 Our approach: Intelligent Cognitive Control System

We propose an Intelligent Cognitive Control System (ICCS), the goal of an ICCS is to detect emotional and cognitive state of the user, alleviate negative emotions and increase positive emotions, using strategies to adapt the virtual environment in order to create the best favorable conditions in order to improve cognitive process. The ICCS is composed of a Savannah VR environment, Neural Agent and Limbic agent. In this section, we detail Savannah VR, Neural Agent, and Limbic Agent which compose our ICCS.

### 7.3.1 Savannah VR

We developed a Savannah VR environment using Unity 3D software in order to relax SCD patients. This environment provides is a therapeutic experience aiming to improve the negative state of SCD patients. The patients follow an avatar walking through a savannah and speaking in a soft and relaxing voice. Combined with VR techniques, this environment offers an immersive experience to the participants, so they feel like in a real savannah. The environment was developed (Dakoure et al., 2020) taking into consideration several parameters able to calm the patients, for instance the dominant color is warm, the animals are calm, and their movement is slow. A soothing piano tune is played as music background. Figure 7.1 illustrates a screen capture of Savannah VR.

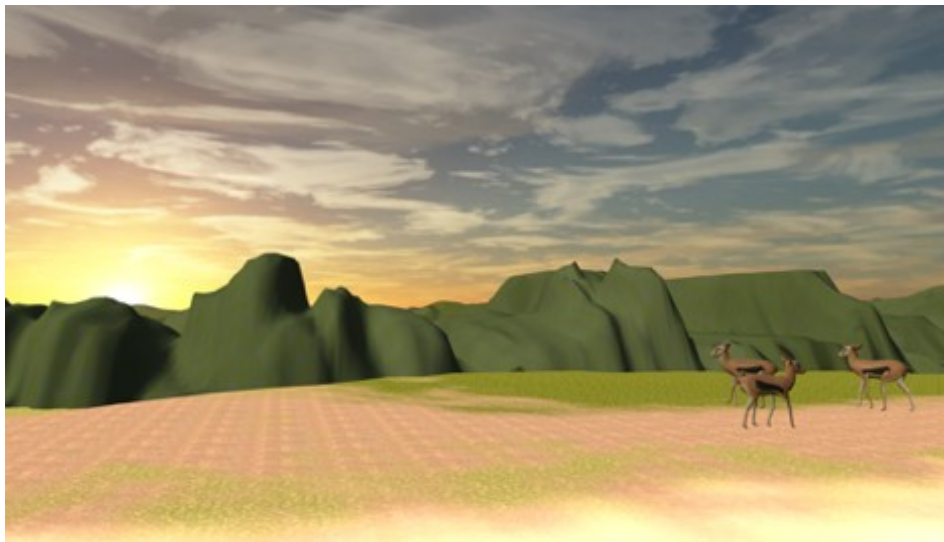


Figure 7.1 - Screenshots of Savannah VR (Dakoure et al., 2020)

Participants automatically follow a gazelle that moves along a precise path with breaking points. They are free to look around them by rotating their head in 360 degree. To avoid nausea caused by movement in virtual reality, users follow the gazelle at low speed. The animal is in front of them to imitate a third person view that is less likely to cause motion sickness (Durko et Petrick, 2016).

Our therapeutic approach propose that the environment's parameters have to be modifiable in real-time. Thus, functions have been implemented that triggers the modification of environment's parameters.

One of the important parameters to be modifiable is the volume, we must choose the volume carefully; too high volume can cause noise pollution (Biamonti et al., 2014). Another adjustable parameter is the color and intensity of the light because light influences perception and decision-making process (Schaler, 2009). The color can also relieve stress more quickly (Lancioni, Singh, et al., 2013).

As an environment with more trees can also relieve stress more quickly and effectively (L. M. Heinrich et Gullone, 2006), it is therefore important to control dynamically the number of trees in the environment. The number of animals can also be decreased, and the sky colors can be changed to have a soothing sunset.

### **7.3.2 Neural Agent**

The goal of our work is to optimize and adapt the therapeutic environment to each participant, we propose to use the Neural Agent developed in (Ben Abdessalem et Frasson, 2017). This agent is able to modify the parameters of Savannah VR detailed in the previous section based on intervention rules triggering a neurofeedback approach.

This agent possesses a rules base containing multiple intervention rules. The Neural Agent operates by tracking the emotions of the patients and modifies Savannah VR accordingly using intervention rules. Giving the main emotion of the patient, the agent selects a rule from this rules base and modifies the VR environment to adapt it to each patient. The structure of one

intervention rule is as following: Rule id, Triggering Emotion, Target Emotion, Action on VR, Weight.

After each intervention, the agent observes the emotional reactions of the patient to check whether or not it does modify the emotional state as desired and updates the weight of the intervention rule.

The Neural Agent is composed of two modules: “Analysis, decision and action” and “Rules base manager” as well as two databases: “Decisions base” and “Rules base”. Figure 7.2 illustrates the architecture of the Neural Agent and its interactions with the Emotions module and Savannah VR.

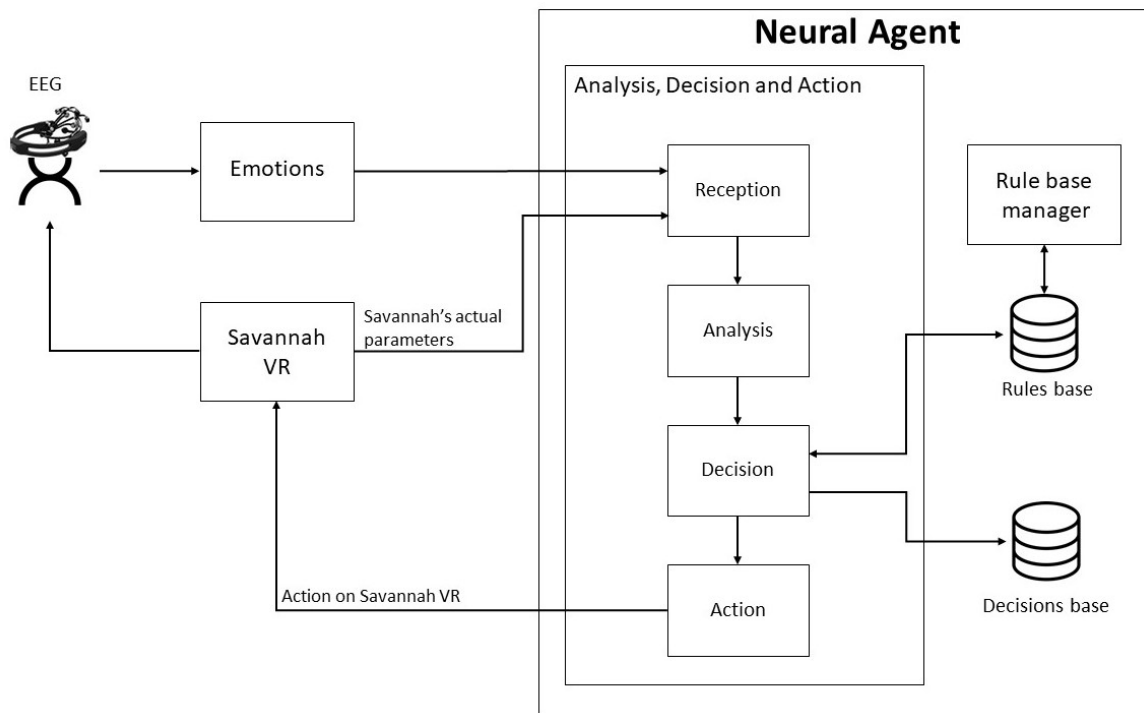


Figure 7.2 - Architecture of the Neural Agent (Ben Abdessalem et al., 2021).

The “Analysis, Decision and Action” handles the data reception, the data analysis, the decisions to make and the actions to perform on Savannah VR. This module stores the agent’s decisions in addition to the user’s emotional reaction in the “Decisions base”. The structure of a decision in the base is as follows: “Participant Id, Rule Id, Triggering Emotion, Target Emotion, Action on VR,

Emotion\_1 before Intervention, ..., Emotion\_n before Intervention, Emotion\_1 after Intervention, ..., Emotion\_n after Intervention, Worked Or Not?"

The "Rules base manager" handles the creation, modification and deletion of the intervention rules and stores them in the "Rules base".

### **7.3.3 Limbic Agent**

The results of our previous work were satisfying but its cognitive capabilities were limited. In order to improve this system, we are interested on how the human brain works and specially the part of the brain which handles the emotions and the memory. We found that the Limbic System is the one which handles the emotions in the brain (Papez, 1937). Sometimes, the Limbic system cannot regulate the emotions and access to memory. Thus, we propose to create a Limbic Agent which allows our system to assist the human Limbic System by modifying the emotions.

The goal of the Limbic Agent in our system is to observe and analyze the interactions between the Neural Agent and the emotional reactions of the patients, then tries to optimize it and improve it. Thus, it should learn from these interactions, create new intervention rules if needed, and predict its impact on the patient.

The Limbic Agent is composed of two modules "Observation and Data preparation" and "Learning and prediction" in addition to one data base "Knowledge Base". Figure 7.3 illustrates the architecture of the Limbic Agent and its interactions with the system.

The role of "Observation and Data preparation" is to collect information from all system components through the Neural Agent's Decisions base. This module manages the reception of data and its preparation in the correct format, and sends these data to the "Learning and prediction" module.

The "Learning and prediction" module is composed of four components 'Analysis', 'Learning', 'Rule creation' and 'Prediction'. The role of 'Analysis' component is to receive structured data, analyze which rule works and which rule did not work according to multiple executions of the same rule, analyze the patient's emotional reaction, and change the weight of rules if needed. Then it transmits the data to the 'Learning' and 'Rule Creation' component.

The role of 'Learning' component is to learn from the execution of the intervention rules and the resulting emotional reaction. It creates a prediction model and transmit it to the 'Prediction' component. It stores the information in the 'Knowledge base' so more information it gets, more the knowledge base growth and more its model will be precise.

The 'Rule creation' component role is to analyze the different emotional impacts of each rule. It does not check if the rule worked as expected or not (this is the role of 'Analysis component'), however, it verifies if the multiple executions of one rule generates a different emotional reaction. Then, a new intervention rule is generated and sent to the 'Prediction' component.

The role of the 'Prediction' component is to predict the emotional impact of a new intervention rule just created by the 'Rule Creation' component using the learning model created by the 'Learning' component. Then, it inserts the new intervention rule in the Neural Agent's rules base with the predicted weight so it can be used in the next iteration.

The *Limbic Agent* is a cognitive agent since it could perform autonomously complex tasks by analyzing the interactions between the Neural Agent and the emotional reactions of the patients, learning from these interactions, modifying existing intervention rules, creating new ones, and finally predicting their impact on a patient.

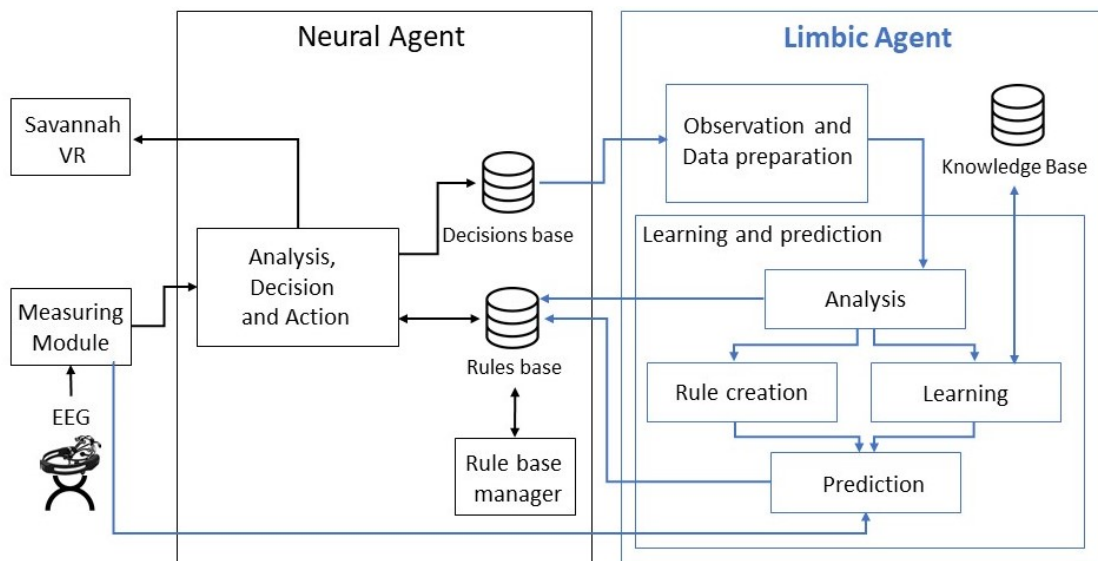


Figure 7.3 - Architecture of the Limbic Agent and its interaction with the system.

## 7.4 Experiments

In our previous work (Ben Abdesslem et al., 2021) we aimed to analyze the impact of the Savannah VR on the memory and attention performances, and for that we created 6 attention and memory exercises. Exercises 1, 2 and 3 are attention tests and exercises 4, 5 and 6 are memory tests.

- Exercise 1: a series of numbers are presented vocally to the participants and they are asked to repeat them in the order of presentation using a numerical pad; then, a second series of numbers are presented vocally and the participants are now asked to report them in the backward order.
- Exercise 2: participants hears a list of letters at a rate of one letter per second and are invited to click the space bar every time they hear the letter "A".
- Exercise 3: images of different objects are shown for a short period of time. Each image is then replaced by four letters and the participant is asked to select the first letter of the object's name.
- Exercise 4: participants are asked to memorize a series of objects presented visually or verbally. Participants are then presented to a series of objects and are asked to determine whether the object was seen visually, auditorily or never presented.
- Exercise 5: several circles are presented to the participant. A series of these circles is highlighted one by one in order to create a sequence. The participants are asked to memorize and reproduce the same sequence.
- Exercise 6: participants are asked to memorize a set of three pictures for a short period of time. Then, we present four sets and the participants are asked to choose the set which corresponds to the one they saw.

### 7.4.1 Process of the experiments

We conducted experiments on 19 participants (12 females) with SCD and a mean age = 71 (SD,8,39).

The participants took part in two sessions: in the first one, we make sure that they met eligibility criteria to perform the experiments during a pre-experiment session (one hour). Our eligibility criteria were the following:

- Older than aged 60 of age,
- Francophone,
- Normal or correct-to-normal vision,
- Normal hearing,
- Met the Consortium for the Early Identification of Alzheimer’s Disease – Quebec (CIMA-Q) criteria for SCD:
  - Presence of a complaint defined as a positive answer to the following statements: “my memory is not as good as it used to be” “and it worries me”
  - MoCA 20-30
  - No impairment on the logical memory scale based on the education-adjusted CIMA-Q cut-off scores.

During this first session, participants were provided with oral and written description of the study and were invited to sign a consent form. The session the included the clinical tests that are necessary to confirm diagnosis and characterize participants. If the participants were eligible, they were invited to the second session.

In the experimental session, the participants start by filling a pre-session form. Then, we equip them with the Emotiv Epoc+ EEG headset, and they begin to perform attention and memory exercises. When the exercises were completed, we equip them with the Fove VR headset, and they started the savannah relaxing neurofeedback system.

Following the savannah, participants completed other examples of the attention and memory exercises and finished by filling a post-experiment forms. Figure 7.4 details the process of the experiment.

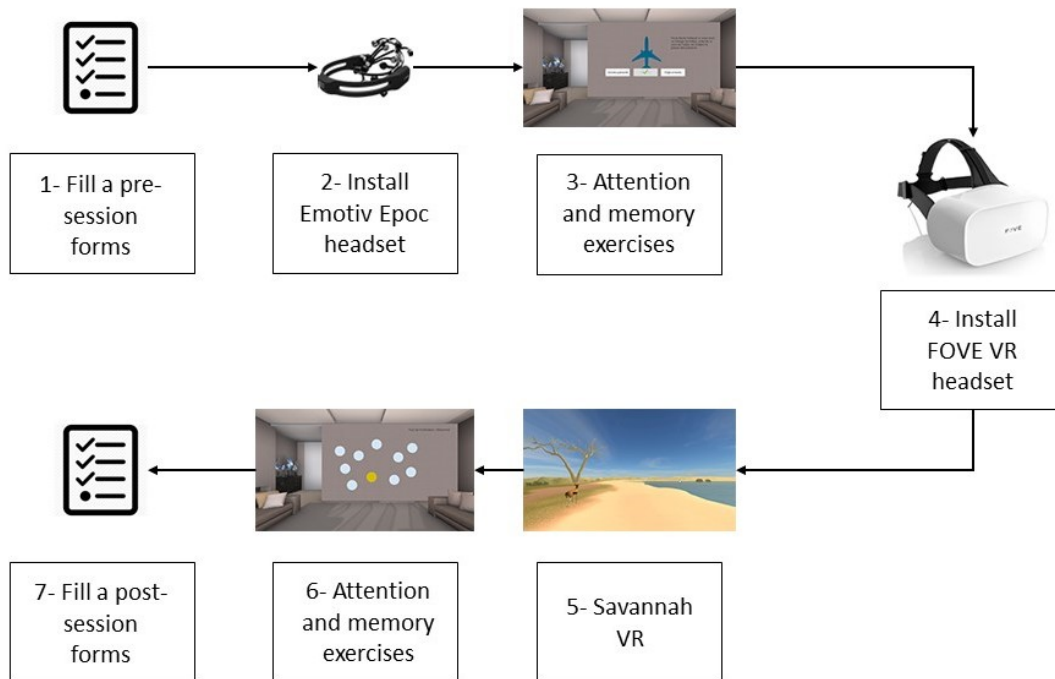


Figure 7.4 - Process of the experiment.

As mentioned in section 7.3.2, the Neural Agent saves the decisions taken during its interactions with Savannah VR environment in addition to the participants' emotional reactions. We will use the data that the Neural Agent stored during these experiments in order to train the Limbic Agent.

## 7.5 Results and Discussion

a We started by analyzing the interaction between the Neural Agent and the emotional reactions, we noticed that the agent's interventions worked expected 244 on a total of 414 (59%), however that the interventions did not work 170 times (41%). Figure 7.5 illustrates a histogram of the number of worked vs not worked intervention rules.



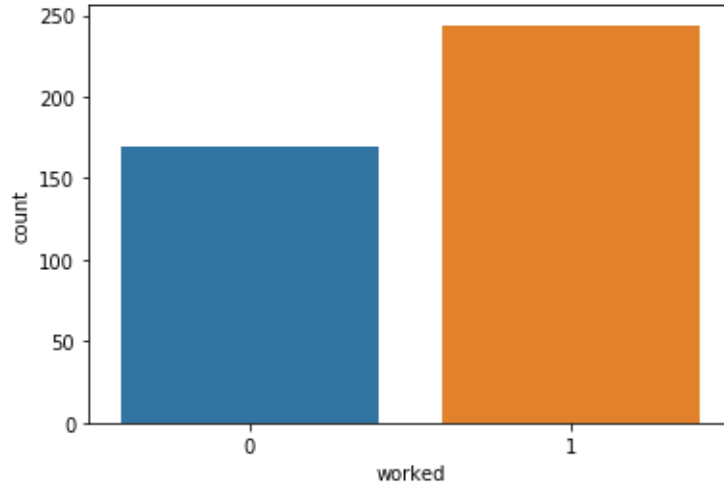


Figure 7.5 - Histogram of the number of worked vs not worked intervention rules.

As we mentioned in section 7.3.3, the ‘Analysis’ component of the Limbic Agent analyses the interactions between the Neural Agent and the patients’ emotional reaction for each rule and modifies the weight of the existent intervention rules that does not work. For instance, the Limbic Agent found that for participant 4, the intervention rule number 1 was not efficient 75%, so it changes it weight to minimum in order to inhibit it for this particular user. The same rule worked 100% for participant 18, so it increases its weight to maximum.

One of the Limbic Agent’s objective is to generate new intervention rules considering the interactions between the Neural Agent and the emotional reactions that each rule generates after the intervention. The ‘Rule creation’ component of the Limbic Agent generated this new rule after analyzing the Neural Agents’ Decisions base:

*rule\_id=14 | triggering\_emotion=negative\_engagement | target\_emotion=positive\_excitement | action= light-intensity-incr | weight=0.5*

This indicates that most of the time, when the patients’ engagement was negative and we increase the light intensity, their excitement went up which results to the creation of this intervention rule.

In order to predict the impact of the new intervention rules, we split the Decisions base into 70% for training and 30% for testing. We used the ‘triggering\_Emotion’, ‘targetting\_Emotion’,

'action', 'engagement\_trend\_before', 'frustration\_tren\_before', 'excitement\_trend\_before', 'valence\_trend\_before', 'meditation\_trend\_before' columns as input features and the model should predict the 'worked' column (labeled 0 or 1). We note that the 'Observation and Data preparation' component already normalized the data as follows: it gives a unique integer for each 'triggerring\_emotion', 'target\_emotion' and action. And for each emotion trend before the intervention rule, it put **1** if the emotion goes up, **-1** if it goes down and **0** if the trend did not change.

We trained the model that predicts if the intervention rules works or not, and we compared the predicted results on testing data with the already known labels to analyze the efficiency of the models. Four (4) supervised learning algorithms have been tested in our study, namely: Decision Tree, Random Forest, K-Nearest Neighbors (KNN) and Support Vector Machine (SVM). For Decision tree, we used the Classification and Regression Trees (CART) version (Loh, 2011). The random forest was set up with 200 estimators. For KNN, the number of k-nearest neighbors was set to 4. Finally, the SVM was set with C equal to 1.0 and gamma as default.

In order to evaluate the model of each algorithm, we use the precision, recall and F1-score indicators. **Precision** is the number of true positives divided by the number of true positives plus the number of false positives; it reflects the ability of a classification model to identify only the relevant data points. **Recall** is the number of true positives divided by the number of true positives plus the number of false negatives; it reflects the ability of a model to find all relevant cases within a dataset. **F1-Score** is a harmonic mean of precision and recall, it reflects how good a model is making a good balance between precision and recall. Table 7.1 details the results of each algorithm.

Table 7.1 - Classification reports of tested algorithms

		Precision	Recall	F1-score	Support
Decision Tree	0	0.51	0.32	0.39	60
	1	0.53	0.72	0.61	65
	Avg/total	0.52	0.53	0.51	125
Random Forest	0	0.55	0.28	0.37	60
	1	0.54	0.78	0.64	65
	Avg/total	0.54	0.54	0.51	125
KNN	0	<b>0.58</b>	<b>0.62</b>	<b>0.60</b>	<b>60</b>
	1	<b>0.62</b>	<b>0.58</b>	<b>0.60</b>	<b>65</b>
	Avg/total	<b>0.60</b>	<b>0.60</b>	<b>0.60</b>	<b>125</b>
SVM	0	0.62	0.22	0.32	60
	1	0.55	0.88	0.67	65
	Avg/total	0.58	0.56	0.50	125

Average precision ranged from 0.52 to 0.6, average recall ranged from 0.53 to 0.6, and F1-score ranged from 0.5 to 0.6. However, we note that for all algorithms except KNN, the models mis-predicted too much class 0 which justifies the low recall and F1-score. KNN model is the only one which predicted both classes (0 and 1) with an accuracy of 60% and has an acceptable Recall and F1-score for both classes. Table 7.2 details the resulting confusion matrix for each tested algorithm.

Table 7.2 - Confusion matrix of tested algorithms

		Predicted 0	Predicted 1
Decision Tree	Actual 0	19	41
	Actual 1	18	47
Random Forest	Actual 0	17	43
	Actual 1	14	51
KNN	Actual 0	<b>37</b>	<b>23</b>
	Actual 1	<b>27</b>	<b>38</b>
SVM	Actual 0	13	47
	Actual 1	8	57

These results can be improved by performing more experiments to increase the Neural Agents' Decisions base and thus increase the size of training data. The more data the 'Learning' component can have, the more knowledge it can get and the more precision the 'Prediction' component can produce.

## 7.6 Conclusion and Future Work

We presented in this work an approach aiming reducing the negative emotions of patients with subjective cognitive decline. We used a Neural Agent which intervenes on a relaxing environment aiming to optimize it and better reduce negative emotions. Experiments were performed and results showed that we can optimize the reduction of negative emotions by controlling the relaxing environment, we proposed an approach consisting of an Intelligent Cognitive Control System (ICCS) able to interact with patient through its brain limbic system. This ICCS is composed of the Neural Agent in addition to a Limbic Agent.

The Limbic Agent was created to make the interactions between the system and the human's Limbic System work better. It analyzes the Neural Agent's intervention and the patients' emotional reaction to this intervention, learn from these interactions and makes corrections to the rules base. In addition, it generates new intervention rules that could work better and predicts their impact. Results showed that the Limbic Agent is capable to analyze the interaction and modify the existing rules by increasing and decreasing their weight. Furthermore, results showed that the agent can generate new rules and predict their efficiency using KNN model with a precision of 60%.

Future work consists of making more experiments to collect more data so that we can improve the trained models and get better results. With more data we could use deep learning techniques which could produces better results. Also, we aim to perform multiple sessions experiments with the same persons so that we can see the evolution of the personalization for each person.

## **Acknowledgments**

We thank Marc Cuesta, Sylvie Belleville, Caroline Dakoure and Marwa Boukadida for their contributions to this work.

We acknowledge NSERC-CRD (National Science and Engineering Research Council), Prompt and Beam Me Up Labs for funding this work.



## Chapitre 8 - Système Limbique Digital

Ce chapitre est l'aboutissement des études précédentes et présente l'architecture d'un **système de contrôle cognitif intelligent (SCCI)** dont le but est de détecter l'état émotionnel et mental d'un utilisateur, atténuer les émotions négatives et augmenter les émotions positives afin d'améliorer son état cognitif. **Ce système vise à soutenir le système limbique humain (SLH)** qui, chez certaines personnes, pourrait être défaillant. Nous rappelons que le SLH est la partie du cerveau qui régularise les émotions et gère, en partie, l'accès à la mémoire et la création de nouveaux souvenirs. Chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer par exemple, le SLH ne fonctionne pas bien et n'arrive pas à régulariser les émotions, ce qui affecte en conséquence l'accès à la mémoire et entraîne, ainsi, d'autres troubles. Le système limbique digital (SLD) permet de se substituer au SLH en essayant d'éliminer les émotions négatives ressenties par les patients à travers la génération d'émotions positives en utilisant du neurofeedback.

Le SLD agit sur les émotions des patients en intervenant dans les EVs dans le but d'améliorer leurs états cognitifs. Les différentes composantes du SLD s'inspirent des composantes du SLH et leurs fonctionnements. Nous présentons dans ce qui suit les différentes parties du SLH qui participent principalement à la gestion des émotions dans le cerveau humain, l'architecture globale du SLD ainsi que, ses interactions avec le SLH et la ressemblance entre les deux.

### 8.1 Système Limbique et Émotions

D'après RajMohan et Mohandas (RajMohan et Mohandas, 2007), le terme « Limbique » a été introduit la première fois en 1878 par Paul Pierre Broca et sa relation avec les émotions a été élaborée par James Papez en 1937 (Papez, 1937). Il a affirmé que les différentes parties du

système limbique constituant un mécanisme qui peut élaborer les fonctions de l'émotion et participer à l'expression émotionnelle (Papez, 1937). Plus tard, le système limbique a souvent été défini comme le «cerveau émotionnel» (Ford et al., 2015).

Le SLH est un système assez complexe, cependant dans le contexte relié aux émotions nous pouvons le simplifier en quatre parties importantes : le Thalamus, l'Hippocampe, l'Amygdale et l'Hypothalamus. La figure 8.1 illustre l'emplacement de ces 4 parties.

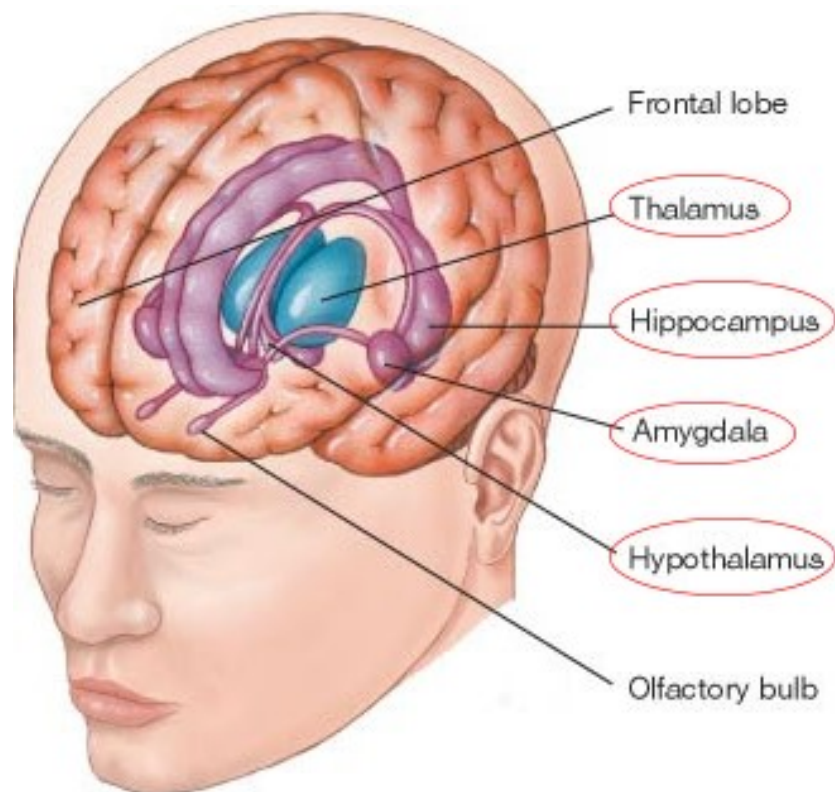


Figure 8.1 - Emplacement des parties du Système Limbique<sup>7</sup>.

**Thalamus** : le Thalamus est situé au centre du cerveau et se compose d'un grand nombre de neurones agissant en réseau (Sherman, 2006). Il fonctionne comme une station de relais transmettant des informations à d'autres parties du cerveau. Dans le contexte des émotions, nous nous intéressons à sa connexion avec l'Amygdale qui se fait indirectement via le cortex visuel. Par

<sup>7</sup> Source image : <https://psychbrain.weebly.com/limbic-system.html>



exemple, il reçoit une entrée visuelle directement de la rétine des yeux et envoie l'information au cortex visuel primaire qui est connecté à l'Amygdale (Rolls, 2015).

**Amygdale** : l'Amygdale joue un rôle fondamental dans le traitement de la mémoire, de la prise de décision et des réponses émotionnelles (Amunts et al., 2005). L'Amygdale, en conjonction avec d'autres parties du cerveau, est impliquée dans la consolidation et la récupération des souvenirs émotionnels (RajMohan et Mohandas, 2007). L'Amygdale envoie des signaux à des zones du cerveau comme l'Hypothalamus pour déclencher une réponse physiologique liée aux émotions.

**Hypothalamus** : l'Hypothalamus régularise le système nerveux autonome via la production et la libération d'hormones, affecte et régule la pression artérielle, la fréquence cardiaque, la faim, la soif, et le cycle sommeil et éveil (RajMohan et Mohandas, 2007). Il aide également l'Amygdale à régulariser les émotions humaines en envoyant des signaux au cerveau afin d'activer des hormones, comme l'adrénaline. L'Hypothalamus contrôle également les molécules qui rendent l'humain triste, exalté ou furieux et génère la réponse physiologique concernant l'émotion ressentie.

**Hippocampe** : l'Hippocampe joue un rôle important dans la création de souvenir et aide à convertir la mémoire courte en mémoire à long terme. L'Hippocampe est essentielle pour le stockage de mémoire à long terme (LaBar et Cabeza, 2006). Dans le contexte lié aux émotions, l'Hippocampe peut influencer la réaction de l'Amygdale à des stimulations émotionnelles, en formant des représentations épisodiques de la signification émotionnelle et de l'interprétation des événements (Phelps, 2004)

## 8.2 Architecture Globale du Système Limbique Digital

Le SLD est composé du *Module de mesures*, de l'*Agent Neural*, et de l'*Agent Limbique*. Ces trois éléments fonctionnent ensemble afin d'assister le SLH dans ses fonctions. Le soutien du SLD se fait à travers une boucle neurofeedback. Comme la figure 8.2 le montre, le système mesure les émotions à travers le *Module de mesures* et agit sur les émotions à travers les interventions de l'*Agent Neural* dans l'EV. L'impact de ces interventions est perçu par le SLH via le thalamus qui

envoie l'information à l'amygdale. L'amygdale gère les réactions émotionnelles avec l'aide de l'hippocampe et déclenche les réactions physiologiques via l'hypothalamus. Ces réactions physiologiques sont interceptées par le *Module de mesures* en utilisant le EEG. L'*Agent Neural* analyse ces réactions et intervient de nouveau dans l'EV si cela est nécessaire. En parallèle, l'*Agent Limbique* surveille les interventions de l'*Agent Neural* et les réactions émotionnelles de l'utilisateur, apprend de ces interactions et améliore le fonctionnement de l'*Agent Neural* en modifiant les règles d'intervention existantes ou en créant de nouvelles règles. Il s'agit donc d'un agent personnalisé (Figure 8.2).

Les interactions entre le SLD et le SLH se font sous la forme d'une boucle fermée. En effet, l'information entre par le **Thalamus** et passe par l'Amygdale qui déclenche des réactions physiologiques à travers l'Hypothalamus. Le *Module de mesures* interprète ces réactions physiologiques et passe l'information à l'*Agent Neural* qui intervient dans l'EV. L'utilisateur regarde l'EV et l'information entre par le **Thalamus**. L'hippocampe et l'*Agent Limbique* sont des acteurs cachés dans cette boucle vu qu'ils n'interviennent pas directement sur la circulation de l'information mais agissent, plutôt, sur les composants de leurs systèmes respectifs.

Toutes les composantes du SLD ainsi que l'élaboration des communications entre elles ont été développées. Cependant, le système complet n'a pas encore été testé en temps réel. Les interactions entre notre SLD et le SLH fonctionnent déjà et ont été testés à travers les expériences présentées dans le premier et deuxième objectif.

Un exemple simplifié de la boucle neurofeedback, consiste en un patient atteint de la maladie d'Alzheimer en interaction avec un EV relaxant et qui perçoit un éléphant. L'information entre par le Thalamus et passe à l'amygdale qui consulte l'Hippocampe. Ce dernier reconnaît l'éléphant et détecte un mauvais souvenir. L'Amygdale reçoit cette information, change l'état émotionnel en un état négatif et déclenche des réactions physiologiques. Le *Module de mesures* détecte un niveau de frustration élevé et envoie l'information à l'*Agent Neural*. Ce dernier, consulte sa base de règles d'intervention, trouve une règle, liée à la frustration, et intervient sur l'EV en remplaçant l'éléphant par un autre animal.

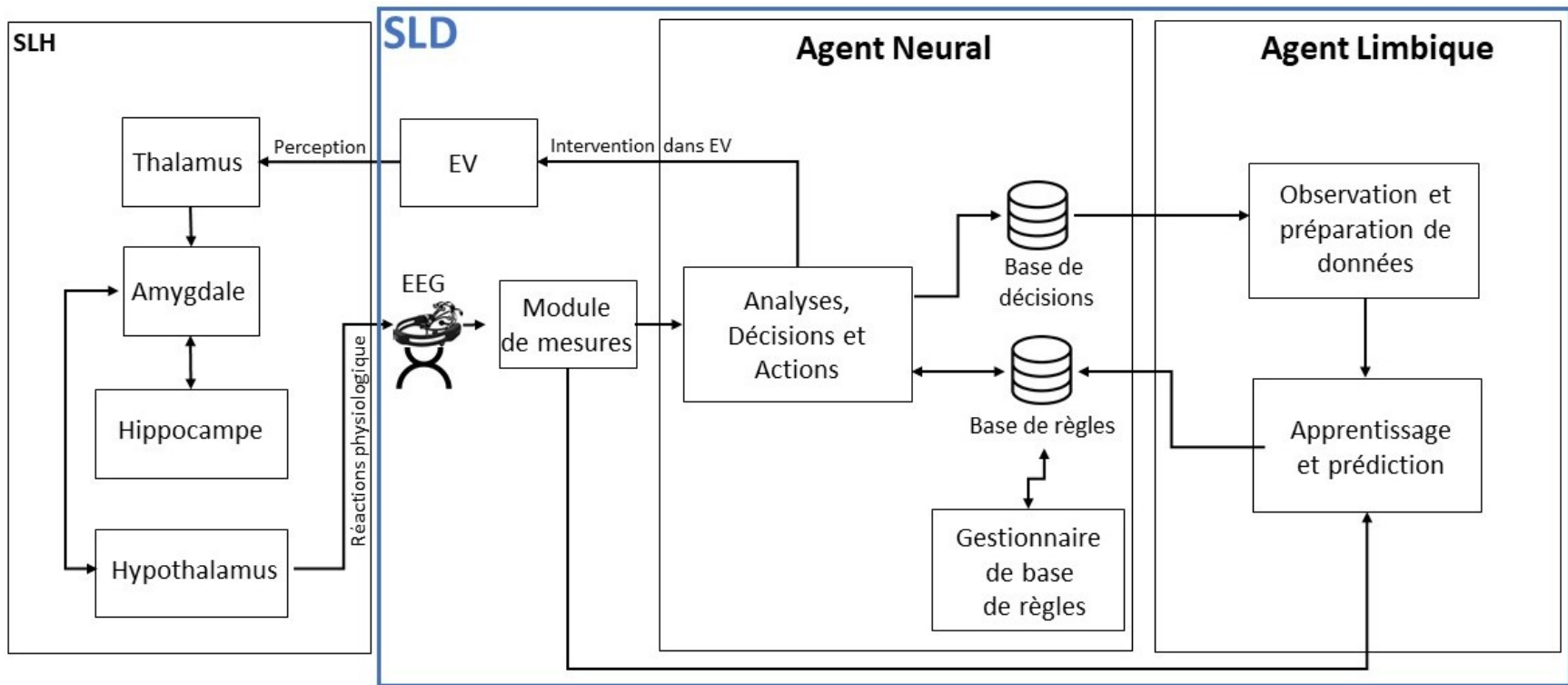


Figure 8.2 - Architecture Globale du SLD.



### 8.3 Similarités entre SLH et SLD

Afin d'assister le SLH, nous nous sommes inspirés de son fonctionnement et de ses composantes dans la conception de notre SLD. Le SLH perçoit l'information à travers le thalamus, qui transmet ces informations vers l'amygdale qui génère des réactions émotionnelles selon l'information reçue. Le SLD possède le même principe de fonctionnement; il perçoit l'information des émotions à travers le *Module de mesures*, qui transmet ces informations à l'*Agent Neural* qui, à son tour, intervient dans l'EV. Le SLD est relié inversement au SLH, cela signifie que le point d'entrée de notre système (*Module de mesures*) se connecte au point de sortie du SLH (*Hypothalamus*) et le point de sortie de notre système (EV) se connecte au point d'entrée du SLH (*Thalamus*) (voir figure 8.2). Par conséquent, le point d'entrée de notre système reçoit les mesures des réactions physiologiques produites par l'*Hypothalamus*, le point de sortie est sous la forme d'un EV dans lequel nous pouvons intervenir et modifier ses éléments, si nécessaire. Cet EV sera perçu directement par le *Thalamus*. De plus, comme l'*Amygdale* qui régularise les émotions et déclenche des réactions physiologiques, l'*Agent Neural* joue le même rôle en intervenant sur l'EV dans le but d'améliorer les émotions. Finalement, similairement à l'*Hippocampe* qui apprend et influence l'*Amygdale*, note *Agent Limbique* apprend et influence l'*Agent Neural* en modifiant les règles d'interventions existantes et en créant de nouvelles règles. La boucle, que crée le SLD avec le SLH, permet d'optimiser l'état cognitif des utilisateurs.



## Chapitre 9 - Conclusion

Dans ce chapitre, nous faisons une synthèse de nos trois contributions et examinons nos travaux futurs.

### 9.1 Contributions

La **première contribution** de cette thèse a été de réaliser un module appelé ***Module de mesures*** capable de suivre en temps réel l'état émotionnel et mental d'un utilisateur lors de son interaction avec un EV. Ce module est capable d'utiliser plusieurs capteurs physiologiques pour qu'il fonctionne convenablement avec plusieurs types d'environnement. A cet effet, nous avons intégré le casque EEG Emotiv Epoc plus, le casque EEG Neeuro SenzeBand et la casque RV FOVE qui possède un traceur de regard intégré. Nous avons utilisé les kits de développement (SDK) logiciel de chacun de ces capteurs physiologiques afin de les intégrer dans notre *Module de mesures*.

Afin de valider le fonctionnement de ce module, nous avons réalisé des environnements qui agissent sur l'état émotionnel et mental d'un utilisateur et nous avons réalisé des études expérimentales pour chaque environnement. Nous avons commencé par le développement d'un jeu sérieux en RV nommé *Inertia* qui a pour but d'apprendre les lois de mouvements en physique et nous avons réalisé une étude expérimentale avec 30 étudiants de l'Université de Montréal. Durant ces expérimentations, nous avons utilisé le casque EEG Emotiv Epoc plus et nous avons réussi à mesurer en temps réel les indices « Excitation, Frustration, Engagement, Meditation et Valence ».

Ensuite, nous avons développé un deuxième environnement de validation qui consiste en un jeu vidéo en VR nommé *AmbuRun*. Durant ce jeu, le joueur contrôle une ambulance et essaie d'arriver à l'hôpital avec les moindres dégâts possibles. Nous avons réalisé une étude expérimentale avec 20 étudiants de l'Université de Montréal en utilisant le casque EEG Emotiv Epoc plus et le casque de RV FOVE qui possède un traceur de regard intégré afin d'investiguer la relation entre l'excitation extraite des EEG et les mouvements des yeux. Les résultats ont montré l'existence d'une relation entre ces deux derniers et que le mouvement des yeux permet de prédire la tendance de l'excitation.

Par la suite, nous avons développé un troisième environnement qui consiste en un *Train Virtuel*. Cet environnement de RV a pour but de relaxer les patients atteints de la maladie d'Alzheimer, réduire leurs émotions négatives et par conséquent, améliorer leurs performances cognitives. Nous avons expérimenté *Train Virtuel* avec 19 participants diagnostiqués avec un DCS, qui est considéré comme un état précoce de la maladie d'Alzheimer, en utilisant le casque EEG Emotiv Epoc plus et le casque de RV FOVE. Les résultats ont montré que nous pouvons suivre les émotions des participants et que *Train Virtuel* est capable de réduire leurs émotions négatives. Les résultats ont montré aussi une augmentation des performances de mémorisation.

Finalement, nous avons réalisé une quatrième étude expérimentale en utilisant la plateforme d'apprentissage des mathématiques *NetMath* avec 17 élèves de 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> année primaire. Cette étude vise à détecter les élèves surdoués en mesurant l'attention et la charge mentale des élèves lors de la résolution des exercices de 6<sup>ème</sup> année primaire. Nous avons utilisé le casque EEG Neeuro SenzeBand, car il est moins intrusif par rapport à Emotiv Epoc plus, et donc mieux pour des enfants. Étant donné que ce casque ne se connecte pas directement à l'ordinateur, nous avons créé une application mobile qui envoie les données EEG à notre *Module de mesures*. Nous avons réussi à mesurer l'attention, la concentration, la charge mentale et la relaxation en temps réel en utilisant ce casque. Cette contribution a fait l'objet de publications dont une présentée dans le chapitre 3.

Notre **deuxième contribution** a constitué à réaliser un agent intelligent appelé **Agent Neural** qui intervient dans les EVs selon l'état émotionnel et mental d'un utilisateur en utilisant



des règles d'interventions. Cet agent utilise les mesures émotionnelles à partir du *Module de mesures*. Le but des interventions de l'*Agent Neural* dans les EVs est d'améliorer l'état émotionnel et cérébral d'un utilisateur. La base de règles d'interventions change selon l'environnement car les améliorations sont relatives à chaque environnement.

Nous avons commencé par réaliser une étude expérimentale en utilisant le jeu *AmbuRun*. Ce sont les mêmes expérimentations présentées dans la première contribution qui ont pour deuxième objectif la validation du fonctionnement de l'*Agent Neural*. Durant cette étude, l'agent intervient sur *AmbuRun* en changeant la vitesse du véhicule et la difficulté selon la frustration et l'excitation du joueur en utilisant quatre règles d'interventions, dans le but d'améliorer l'expérience de jeu. Les résultats ont montré que lorsque l'*Agent Neural* adapte le jeu, cela agit positivement sur la frustration et l'excitation du joueur. De plus, les résultats d'un questionnaire d'auto-évaluation auquel les participants ont répondu après l'expérience, ont confirmé que l'adaptation du jeu avait amélioré leurs expériences de jeu dans *AmbuRun*.

Par la suite, nous avons réalisé une étude expérimentale en utilisant *Hypocrates*, une plateforme éducative en RV pour les étudiants en médecine, qui vise à tester leurs connaissances et leur raisonnement clinique. Durant cette étude, le but de l'*Agent Neural* était d'intervenir dans *Hypocrates* pour provoquer de la frustration chez les étudiants et tester leurs performances et raisonnements dans des cas extrêmes. Nous avons expérimenté *Hypocrates* et l'*Agent Neural* avec 15 étudiants en 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année médecine et les résultats ont montré que, suite aux interventions de l'agent, le niveau de frustration des étudiants augmente et par conséquent, la moyenne des mauvais choix successifs en raisonnement clinique augmente aussi.

Ensuite, nous avons réalisé une étude expérimentale en utilisant *Hypocrates+* une autre version de *Hypocrates* munie d'une nouvelle composante d'aide en temps réel. *Hypocrates+* vise non seulement à tester les compétences des étudiants en médecine, mais aussi, à les aider. L'*Agent Neural* intervient dans *Hypocrates+* afin de déclencher de l'aide en cas de détection d'émotions négatives ou en cas d'erreur dans le raisonnement clinique. Ainsi, Le rôle de l'*Agent Neural* dans *Hypocrates+* est différent de son rôle dans *Hypocrates*. Nous avons testé *Hypocrates+* avec 5 étudiants en 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année médecine. Les résultats préliminaires montrent que l'*Agent*

*Neural* peut déclencher de l'aide aux étudiants en cas de détection d'émotions négatives ou d'erreur dans le raisonnement et que ces interventions peuvent diminuer leur émotions négatives.

Finalement, nous avons réalisé une étude expérimentale en utilisant *Savannah VR*, qui consiste en un environnement thérapeutique immersif en RV basé sur la thérapie de la nature, visant à relaxer les patients Alzheimer et réduire leurs émotions négatives. Dans cette étude, nous avons utilisé notre *Agent Neural* afin d'intervenir dans *Savannah VR* et l'adapter pour optimiser l'effet de relaxation sur les patients atteints de la maladie Alzheimer et, par conséquent, améliorer leurs performances cognitives. Nous avons réalisé des expérimentations avec 19 participants diagnostiqués avec un déclin cognitif subjectif. Les résultats ont montré que l'environnement réduit la frustration des patients durant la thérapie et l'effet de la relaxation demeure le même après celle-ci. Les résultats ont montré aussi que, l'*Agent Neural* est capable d'adapter l'EV et d'amplifier l'effet de la relaxation sur les participants. Les résultats ont montré aussi que les performances de mémoire des patients s'améliorent après *Savannah VR* et l'adaptation de l'*Agent Neural*.

Notre **troisième contribution** a été de réaliser un agent intelligent appelé ***Agent Limbique***, qui complète l'*Agent Neural*, afin d'améliorer son fonctionnement et maximiser le nombre des interventions positives. L'*Agent Limbique* apprend des interventions de l'*Agent Neural* et des réactions émotionnelles de chaque intervention afin de la modifier ou créer une nouvelle intervention.

Nous avons utilisé les données collectées durant les expériences réalisées avec l'environnement relaxant *Savannah VR* pour entraîner et tester l'*Agent Limbique*. Les résultats préliminaires ont montré que cet agent est capable d'analyser les règles qui fonctionnent et celles qui ne fonctionnent pas et de modifier les poids attribués aux règles afin de les inhiber ou bien maximiser leur utilisation. Les résultats ont montré aussi que l'*Agent Limbique* est capable de générer une nouvelle règle d'intervention. De plus, nous avons entraîné un modèle, en utilisant l'apprentissage machine, afin de prédire l'impact d'une règle d'intervention et les résultats ont montré que ce modèle est capable de réaliser cette prédiction.

En combinant nos trois contributions; à savoir le *Module de mesures*, l'*Agent Neural* et l'*Agent Limbique*, nous avons créé un système de contrôle cognitive intelligent, que nous avons nommé **Système Limbique Digital**. Ce système est capable d'assister le SLH, la partie qui gère, entre autres, les émotions dans le cerveau humain, afin de régulariser les émotions.

## 9.2 Travaux futurs

L'objectif était de concevoir un système qui régularise les états émotionnels et mentaux à travers des interventions sur des EVs. Nous avons réalisé les différentes composantes de ce système, le *Module de mesures*, l'*Agent Neural* et l'*Agent Limbique* et nous avons réussi à les intégrer ensemble. Nos travaux présentent cependant quelques limitations qui laissent remarquer de nombreuses perspectives de recherche. En voici quelques exemples:

- **Améliorer la prédiction de l'indice d'excitation à partir du suivi du regard:**  
Le modèle de prédiction de l'indice d'excitation, réalisé dans cette thèse, a été entraîné avec des données EEG lors d'une interaction avec un jeu vidéo. Nous comptons créer d'autres environnements qui génèrent de l'excitation et réaliser des expérimentations afin de collecter plus de données. Ces données, vont nous permettre d'entraîner le modèle de prédiction dans le but d'avoir de meilleurs résultats en termes de précision.
- **Utiliser un autre équipement de suivi du regard afin d'extraire d'autres mesures:**  
Le casque FOVE VR ne fournit que l'emplacement des yeux, il ne fournit pas d'autres mesures nécessaires dans l'extraction d'états émotionnels et mentaux. Les casques EEG sont précis mais, dans certain cas, il n'est pas possible de les utiliser et c'est la raison pour laquelle nous cherchons d'autres outils de mesures. Nous comptons donc utiliser un autre casque de RV comme le VIVE Pro Eye Office<sup>8</sup> qui donne la mesure du diamètre de la pupille. Cette mesure nous permettra d'extraire les indices d'attention et de concentration directement du traceur de regard sans utiliser les casques EEG.

---

<sup>8</sup> <https://entreprise.vive.com/ca-fr/product/vive-pro-eye-office/>

- **Étendre la base de données de l'Agent Neural et améliorer le modèle de prédiction de l'Agent Limbique:**

L'une des fonctionnalités de l'Agent Limbique est de prédire l'impact d'une règle d'intervention sur un utilisateur. Afin de prédire cet impact, l'agent doit apprendre des interventions de l'Agent Neural et les réactions émotionnelles des utilisateurs. Les données, que nous avons collectées, ont aidé à créer le modèle de prédiction mais ne sont pas suffisantes pour avoir un modèle avec une bonne précision. Il est important de réaliser plus d'expérimentation afin d'étendre la base de données de l'Agent Neural et améliorer la prédiction de l'Agent Limbique

- **Tester le SLD en temps réel avec les mêmes participants:**

Nous comptons réaliser des expérimentations en utilisant le SLD avec différents environnements afin de valider son fonctionnement et l'améliorer en cas de besoin. Nous comptons réaliser ces expérimentations avec les mêmes participants, afin que le SLD puisse étendre sa base de connaissance et bien régulariser les émotions de chaque participant. Plus nous réalisons des expérimentations avec les mêmes utilisateurs, plus le système est capable d'assister leurs SLH.

- **Plus d'expérimentation pour pouvoir généraliser les résultats:**

Étant donné que le nombre des participants dans les expériences réalisées est restreint, nous comptons réaliser plus d'expérimentations afin de pouvoir généraliser les résultats obtenus et les conclusions. De plus nous comptons réaliser des expériences avec des groupes de contrôle afin de valider les conclusions obtenues lors de nos expérimentations précédentes.

## Références bibliographiques

- Abo-Zahhad, M., Ahmed, S. M. et Abbas, S. N. (2015). A New EEG Acquisition Protocol for Biometric Identification Using Eye Blinking Signals. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 7(6), 48-54. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2015.06.05>
- Alvarez, R. P., Johnson, L. et Grillon, C. (2007). Contextual-specificity of short-delay extinction in humans: Renewal of fear-potentiated startle in a virtual environment. *Learning & Memory*, 14(4), 247-253. <https://doi.org/10.1101/lm.493707>
- Amunts, K., Kedo, O., Kindler, M., Pieperhoff, P., Mohlberg, H., Shah, N. J., Habel, U., Schneider, F. et Zilles, K. (2005). Cytoarchitectonic mapping of the human amygdala, hippocampal region and entorhinal cortex: intersubject variability and probability maps. *Anatomy and Embryology*, 210(5-6), 343-352. <https://doi.org/10.1007/s00429-005-0025-5>
- Aspinall, P., Mavros, P., Coyne, R. et Roe, J. (2015). The urban brain: analysing outdoor physical activity with mobile EEG. *Br J Sports Med*, 49(4), 272-276. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091877>
- Balling, J. D. et Falk, J. H. (1982). Development of Visual Preference for Natural Environments. *Environment and Behavior*, 14(1), 5-28. <https://doi.org/10.1177/0013916582141001>
- Bechara, A., Damasio, H. et Damasio, A. R. (2000). Emotion, Decision Making and the Orbitofrontal Cortex. *Cerebral Cortex*, 10(3), 295-307. <https://doi.org/10.1093/cercor/10.3.295>
- Ben Abdessalem, H., Boukadida, M. et Frasson, C. (2018a). Emotional State and Behavior Analysis in a Virtual Reality Environment: A Medical Application. Dans R. Nkambou, R. Azevedo et

- J. Vassileva (dir.), *Intelligent Tutoring Systems* (vol. 10858, p. 287-293). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91464-0\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91464-0_29)
- Ben Abdessalem, H., Boukadida, M. et Frasson, C. (2018b). Virtual Reality Game Adaptation Using Neurofeedback. *Florida Artificial Intelligence Research Society Conference (Flairs-31)*. Melbourne, Florida, USA, 276-281
- Ben Abdessalem, H., Byrns, A., Cuesta, M., Manera, V., Robert, P., Bruneau, M.-A., Belleville, S. et Frasson, C. (2020). *Application of Virtual Travel for Alzheimer's Disease*: 9th International Conference on Sensor Networks, Valletta, Malta (p. 52-60). <https://doi.org/10.5220/0008976700520060>
- Ben Abdessalem, H., Byrns, A. et Frasson, C. (2021). Optimizing Alzheimer's Disease Therapy Using a Neural Intelligent Agent-Based Platform. *International Journal of Intelligence Science*, 11(02), 70-96. <https://doi.org/10.4236/ijis.2021.112006>
- Ben Abdessalem, H., Chaouachi, M., Boukadida, M. et Frasson, C. (2019a). How Do Players' Eye Movements Relate to Their Excitement in a VR Adaptive Game? *Florida Artificial Intelligence Research Society Conference(Flairs-32)*. Sarasota, Florida, USA, 270-275.
- Ben Abdessalem, H., Chaouachi, M., Boukadida, M. et Frasson, C. (2019b). Toward Real-Time System Adaptation Using Excitement Detection from Eye Tracking. Dans A. Coy, Y. Hayashi et M. Chang (dir.), *Intelligent Tutoring Systems* (vol. 11528, p. 214-223). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22244-4\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22244-4_26)
- Ben Abdessalem, H. et Frasson, C. (2017). Real-time Brain Assessment for Adaptive Virtual Reality Game : A Neurofeedback Approach. Dans C. Frasson et G. Kostopoulos (dir.), *Brain Function Assessment in Learning* (vol. 10512, p. 133-143). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-67615-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-67615-9_12)
- Benoit, M., Dygai, I., Migneco, O., Robert, P., Bertogliati, C., Darcourt, J., Benoliel, J., Aubin-Brunet, V. et Pringuey, D. (1999a). Behavioral and psychological symptoms in Alzheimer's disease. *Dementia and geriatric cognitive disorders*, 10(6), 511-517.

- Benoit, M., Dygai, I., Migneco, O., Robert, P., Bertogliati, C., Darcourt, J., Benoliel, J., Aubin-Brunet, V. et Pringuey, D. (1999b). Behavioral and psychological symptoms in Alzheimer's disease. *Dementia and geriatric cognitive disorders*, 10(6), 511-517.
- Berka, C., Levendowski, D. J., Lumicao, M. N., Yau, A., Davis, G., Zivkovic, V. T., Olmstead, R. E., Tremoulet, P. D. et Craven, P. L. (2007). EEG correlates of task engagement and mental workload in vigilance, learning, and memory tasks. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 78(5 Suppl), B231-244.
- Bhardwaj, A., Gupta, A., Jain, P., Rani, A. et Yadav, J. (2015, février). *Classification of human emotions from EEG signals using SVM and LDA Classifiers*. 2015 2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), Noida, Delhi-NCR, India (p. 180-185). <https://doi.org/10.1109/SPIN.2015.7095376>
- Biamonti, A., Gramegna, S. et Imamogullari, B. (2014). *A design experience for the enhancement of the quality of life in people with alzheimer's*. What's On (p. 273-284).
- Biocca, F. (2006). The Cyborg's Dilemma: Progressive Embodiment in Virtual Environments. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2), 0-0. <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00070.x>
- Biocca, F. et Levy, M. R. (1995). *Communication in the age of virtual reality* (Routledge).
- Bohil, C. J., Alicea, B. et Biocca, F. A. (2011). Virtual reality in neuroscience research and therapy. *Nature Reviews Neuroscience*, 12(12), 752-762. <https://doi.org/10.1038/nrn3122>
- Boucsein, W. (2012). *Electrodermal Activity*. Springer Science & Business Media.
- Boyle, P. A., Yu, L., Leurgans, S. E., Wilson, R. S., Brookmeyer, R., Schneider, J. A. et Bennett, D. A. (2019). Attributable risk of Alzheimer's dementia attributed to age-related neuropathologies. *Annals of neurology*, 85(1), 114-124.
- Bradley, M. M. et Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25(1), 49-59. [https://doi.org/10.1016/0005-7916\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0005-7916(94)90063-9)

- Bradt, J., Magee, W. L., Dileo, C., Wheeler, B. L. et McGilloway, E. (2010). Music therapy for acquired brain injury. Dans The Cochrane Collaboration (dir.), *Cochrane Database of Systematic Reviews* (p. CD006787.pub2). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD006787.pub2>
- Brigham, T. J. (2017). Merging Technology and Emotions: Introduction to Affective Computing. *Medical Reference Services Quarterly*, 36(4), 399-407. <https://doi.org/10.1080/02763869.2017.1369289>
- Byrns, A., Ben Abdesslem, H., Cuesta, M., Bruneau, M.-A., Belleville, S. et Frasson, C. (2020a). Adaptive Music Therapy for Alzheimer’s Disease Using Virtual Reality. Dans V. Kumar et C. Troussas (dir.), *Intelligent Tutoring Systems* (vol. 12149, p. 214-219). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49663-0\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49663-0_25)
- Byrns, A., Ben Abdesslem, H., Cuesta, M., Bruneau, M.-A., Belleville, S. et Frasson, C. (2020b). EEG Analysis of the Contribution of Music Therapy and Virtual Reality to the Improvement of Cognition in Alzheimer’s Disease. *Journal of Biomedical Science and Engineering*, 13(08), 187-201. <https://doi.org/10.4236/jbise.2020.138018>
- Cacioppo, J. T. et Cacioppo, S. (2018). The growing problem of loneliness. *The Lancet*, 391(10119), 426.
- Catani, M., Dell’Acqua, F. et Thiebaut de Schotten, M. (2013). A revised limbic system model for memory, emotion and behaviour. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(8), 1724-1737. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.07.001>
- Chakladar, D. D. et Chakraborty, S. (2018). EEG based emotion classification using “Correlation Based Subset Selection”. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, 24, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.bica.2018.04.012>
- Chanel, G., Rebetez, C., Bétrancourt, M. et Pun, T. (2011). Emotion Assessment From Physiological Signals for Adaptation of Game Difficulty. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 41(6), 1052-1063. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2011.2116000>



- Chang, Y., Chu, H., Yang, C., Tsai, J., Chung, M., Liao, Y., Chi, M., Liu, M. F. et Chou, K. (2015). The efficacy of music therapy for people with dementia: a meta-analysis of randomised controlled trials. *Journal of Clinical Nursing*, 24(23-24), 3425-3440.
- Chaouachi, M. et Frasson, C. (2012). Mental Workload, Engagement and Emotions: An Exploratory Study for Intelligent Tutoring Systems. Dans S. A. Cerri, W. J. Clancey, G. Papadourakis et K. Panourgia (dir.), *Intelligent Tutoring Systems* (vol. 7315, p. 65-71). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-30950-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30950-2_9)
- Chaouachi, M., Jraidi, I. et Frasson, C. (2015a). *Adapting to learners' mental states using a physiological computing approach*. The Twenty-Eighth International Flairs Conference, Hollywood, Florida, USA (p. 257-262).
- Chaouachi, M., Jraidi, I., et Frasson, C. (2015). Adapting to Learners' Mental States Using a Physiological Computing Approach. *FLAIRS 2015: The Twenty-Eighth International Flairs Conference*.
- Chaouachi, M., Jraidi, I. et Frasson, C. (2015b). MENTOR: A Physiologically Controlled Tutoring System. Dans F. Ricci, K. Bontcheva, O. Conlan et S. Lawless (dir.), *User Modeling, Adaptation and Personalization* (vol. 9146, p. 56-67). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20267-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20267-9_5)
- Clore, G. L. et Huntsinger, J. R. (2007). How emotions inform judgment and regulate thought. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(9), 393-399. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.08.005>
- Conn, H. O. (1977). Trailmaking and number-connection tests in the assessment of mental state in portal systemic encephalopathy. *The American Journal of Digestive Diseases*, 22(6), 541-550. <https://doi.org/10.1007/BF01072510>
- Coughlan, G., Laczó, J., Hort, J., Minihane, A.-M. et Hornberger, M. (2018). Spatial navigation deficits—overlooked cognitive marker for preclinical Alzheimer disease? *Nature Reviews Neurology*, 14(8), 496-506.
- Coyle, H., Traynor, V. et Solowij, N. (2015). Computerized and Virtual Reality Cognitive Training for Individuals at High Risk of Cognitive Decline: Systematic Review of the Literature. *The*

*American Journal of Geriatric Psychiatry*, 23(4), 335-359.  
<https://doi.org/10.1016/j.jagp.2014.04.009>

Dakoure, C., Ben Abdesslem, H., Boukadida, M., Cuesta, M., Bruneau, M.-A., Belleville, S. et Frasson, C. (2020). Virtual Savannah: An Effective Therapeutic and Relaxing Treatment for People with Subjective Cognitive Decline. Dans P. Vlamos, P. Bamidis et C. Frasson (dir.), *Brain Function Assessment in Learning* (vol. 12462, p. 107-112). Springer International Publishing.

Damasio, A. R. (1994). *Descartes' error: emotion, reason, and the human brain*.

de la Rubia Ortí, José Enrique, García-Pardo, M. P., Iranzo, C. C., Madrigal, J. J. C., Castillo, S. S., Rochina, M. J. et Gascó, V. J. P. (2018). Does Music Therapy Improve Anxiety and Depression in Alzheimer's Patients? *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 24(1), 33-36.

de la Rubia Ortí, Jose Enrique, Pardo, M. P. G., Benlloch, M., Drehmer, E., Platero, J. L., Sancho, D. et Rodriguez, M. M. L. (2019). Music Therapy Decreases Sadness and Increases Happiness in Alzheimer Patients: A Pilot Study.

de la Torre-Luque, A., Caparros-Gonzalez, R. A., Bastard, T., Vico, F. J. et Buela-Casal, G. (2017). Acute stress recovery through listening to Melomics relaxing music: a randomized controlled trial. *Nordic Journal of Music Therapy*, 26(2), 124-141.

Demos, J. N. (2005). *Getting Started with Neurofeedback*. WW Norton.

D'Mello, S., Olney, A., Williams, C. et Hays, P. (2012). Gaze tutor: A gaze-reactive intelligent tutoring system. *International Journal of Human-Computer Studies*, 70(5), 377-398.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2012.01.004>

D'Mello, S., Taylor, R., Davidson, K. et Graesser, A. (2008). Self Versus Teacher Judgments of Learner Emotions During a Tutoring Session with AutoTutor. Dans B. P. Woolf, E. Aïmeur, R. Nkambou et S. Lajoie (dir.), *Intelligent Tutoring Systems* (vol. 5091, p. 9-18). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69132-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69132-7_6)

- Doctor, F., Iqbal, R. et Naguib, R. N. G. (2014). A fuzzy ambient intelligent agents approach for monitoring disease progression of dementia patients. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 5(1), 147-158. <https://doi.org/10.1007/s12652-012-0135-x>
- Duric, N. S., Elgen, I. et Assmus, J. (2014). Self-reported efficacy of neurofeedback treatment in a clinical randomized controlled study of ADHD children and adolescents. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 1645. <https://doi.org/10.2147/NDT.S66466>
- Durko, A. M. et Petrick, J. F. (2016). Travel as Relationship Therapy: Examining the Effect of Vacation Satisfaction Applied to the Investment Model. *Journal of Travel Research*, 55(7), 904-918. <https://doi.org/10.1177/0047287515592970>
- Dursun, P., Emül, M. et Gençöz, F. (2010). A review of the literature on emotional facial expression and its nature. *Yeni Symposium: psikiyatri, nöroloji ve davranış bilimleri dergisi*, 48(3), 207-215.
- Evans, D. (2001). *Emotion: the science of sentiment*. Oxford University Press.
- Ferber, J. et Perrot, J.-F. (1995). *Les systèmes multi-agents vers une intelligence collective*. InterEditions.
- Ford, J. D., Grasso, D. J., Elhai, J. D. et Courtois, C. A. (2015). Neurobiology of traumatic stress disorders and their impact on physical health. Dans *Posttraumatic Stress Disorder* (p. 183-232). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801288-8.00005-4>
- Freeman, D., Evans, N., Lister, R., Antley, A., Dunn, G. et Slater, M. (2014). Height, social comparison, and paranoia: An immersive virtual reality experimental study. *Psychiatry Research*, 218(3), 348-352. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2013.12.014>
- Frommel, J., Fischbach, F., Rogers, K. et Weber, M. (2018, 23 octobre). *Emotion-based Dynamic Difficulty Adjustment Using Parameterized Difficulty and Self-Reports of Emotion*. CHI PLAY '18: The annual symposium on Computer-Human Interaction in Play, Melbourne VIC Australia (p. 163-171). <https://doi.org/10.1145/3242671.3242682>

- Frumkin, H. (2001). Beyond toxicity<sup>11</sup>The full text of this article is available via AJPM Online at [www.elsevier.com/locate/ajpmonline](http://www.elsevier.com/locate/ajpmonline). *American Journal of Preventive Medicine*, 20(3), 234-240. [https://doi.org/10.1016/S0749-3797\(00\)00317-2](https://doi.org/10.1016/S0749-3797(00)00317-2)
- Gallego, M. G. et García, J. G. (2017). Music therapy and Alzheimer's disease: Cognitive, psychological, and behavioural effects. *Neurología (English Edition)*, 32(5), 300-308.
- Ganjoo, A. (2005). Designing Emotion-Capable Robots, One Emotion at a Time. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 27(27).
- Geretsegger, M., Elefant, C., Mössler, K. A. et Gold, C. (2014). Music therapy for people with autism spectrum disorder. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (6).
- Ghali, R., Ben Abdesslem, H. et Frasson, C. (2017). *Improving intuitive reasoning through assistance strategies in a virtual reality game*. The Thirtieth International Flairs Conference, Marco Island, Florida, USA, 382-387.
- Ghali, R., Ben Abdesslem, H., Frasson, C. et Nkambou, R. (2018). Identifying Brain Characteristics of Bright Students. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 10(03), 93-103. <https://doi.org/10.4236/jilsa.2018.103006>
- Gilley, P., Walker, N. et Sharma, A. (2014). Abnormal Oscillatory Neural Coupling in Children with Language-Learning Problems and Auditory Processing Disorder. *Seminars in Hearing*, 35(01), 015-026. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1363521>
- Gorini, A. et Riva, G. (2008). Virtual reality in anxiety disorders: the past and the future. *Expert Review of Neurotherapeutics*, 8(2), 215-233. <https://doi.org/10.1586/14737175.8.2.215>
- Guillaume Asselin. (2013). *Une approche multi-agents pour le développement d'un jeu vidéo*. Université de Montréal.
- Gutica, M. et Conati, C. (2013, septembre). *Student Emotions with an Edu-game: A Detailed Analysis* (p. 534-539). <https://doi.org/10.1109/ACII.2013.94>
- Gutiérrez, E. O. F. et Camarena, V. A. T. (2015). Music therapy in generalized anxiety disorder. *The Arts in Psychotherapy*, 44, 19-24.

- Hawkley, L. C. et Cacioppo, J. T. (2003). Loneliness and pathways to disease. *Brain, behavior, and immunity*, 17(1), 98-105.
- Heinrich, H., Gevensleben, H. et Strehl, U. (2007). Annotation: Neurofeedback ? train your brain to train behaviour. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 48(1), 3-16. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01665.x>
- Heinrich, L. M. et Gullone, E. (2006). The clinical significance of loneliness: A literature review. *Clinical psychology review*, 26(6), 695-718.
- Hill, N. T. M., Mowszowski, L., Naismith, S. L., Chadwick, V. L., Valenzuela, M. et Lampit, A. (2017). Computerized Cognitive Training in Older Adults With Mild Cognitive Impairment or Dementia: A Systematic Review and Meta-Analysis. *American Journal of Psychiatry*, 174(4), 329-340. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2016.16030360>
- Horlings, R., Datcu, D. et Rothkrantz, L. J. M. (2008). *Emotion recognition using brain activity*. the 9th International Conference, Gabrovo, Bulgaria (p. II.1). <https://doi.org/10.1145/1500879.1500888>
- Horváthová, D. et Siládi, V. (2016). Creating virtual environments for phobia treatment. *Open Computer Science*, 6(1), 138-147. <https://doi.org/10.1515/comp-2016-0012>
- Izard, C.E. (1993). *The Differential Emotions Scale: DES IV-A; [a Method of Measuring the Meaning of Subjective Experience of Discrete Emotions]*. University of Delaware.
- Jha, M. K., Ben Abdessalem, H., Boukadida, M., Byrns, A., Cuesta, M., Bruneau, M.-A., Belleville, S. et Frasson, C. (2020). Virtual Reality Orientation Game for Alzheimer's Disease Using Real-Time Help System. Dans P. Vlamos, P. Bamidis et C. Frasson (dir.), *Brain Function Assessment in Learning* (vol. 12462, p. 13-23). Springer International Publishing.
- King, J., Jones, K., Goldberg, E., Rollins, M., MacNamee, K., Moffit, C., Naidu, S., Ferguson, M., Garcia-Leavitt, E. et Amaro, J. (2019). Increased functional connectivity after listening to favored music in adults with Alzheimer dementia. *The journal of prevention of Alzheimer's disease*, 6(1), 56-62.

- Kun, A. L., Palinko, O., Medenica, Z. et Heeman, P. A. (2013). On the Feasibility of Using Pupil Diameter to Estimate Cognitive Load Changes for In-Vehicle Spoken Dialogues. *Proceedings of Interspeech*, 3766-70.
- LaBar, K. S. et Cabeza, R. (2006). Cognitive neuroscience of emotional memory. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(1), 54-64. <https://doi.org/10.1038/nrn1825>
- Lancioni, G. E., Perilli, V., O'Reilly, M. F., Singh, N. N., Sigafos, J., Bosco, A., Caffo, A. O., Picucci, L., Cassano, G. et Groeneweg, J. (2013). Technology-based orientation programs to support indoor travel by persons with moderate Alzheimer's disease: impact assessment and social validation. *Research in Developmental Disabilities*, 34(1), 286-293.
- Lancioni, G. E., Singh, N. N., O'Reilly, M. F., Sigafos, J., Renna, C., Ventrella, M., Pinto, K., Minervini, M. G., Oliva, D. et Groeneweg, J. (2013). Supporting daily activities and indoor travel of persons with moderate Alzheimer's disease through standard technology resources. *Research in developmental disabilities*, 34(8), 2351-2359.
- Landes, A. M., Sperry, S. D., Strauss, M. E. et Geldmacher, D. S. (2001). Apathy in Alzheimer's disease. *Journal of the American Geriatrics Society*, 49(12), 1700-1707.
- Lang, P. J. (1995). The emotion probe: Studies of motivation and attention. *American Psychologist*, 50(5), 372-385. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.50.5.372>
- Laura, F. et Michela, O. (2015). A LITERATURE REVIEW ON IMMERSIVE VIRTUAL REALITY IN EDUCATION: STATE OF THE ART AND PERSPECTIVES. *Conference Proceedings of ELearning and Software for Education (ELSE)*, 133-141. <https://doi.org/10.12753/2066-026X-15-020>
- Lawton, M. P., Van Haitsma, K. et Klapper, J. (1996). Observed affect in nursing home residents with Alzheimer's disease. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 51(1), P3-P14.
- Lecuyer, A., Lotte, F., Reilly, R. B., Leeb, R., Hirose, M. et Slater, M. (2008). Brain-Computer Interfaces, Virtual Reality, and Videogames. *Computer*, 41(10), 66-72. <https://doi.org/10.1109/MC.2008.410>

- Li, W., Hu, X., Long, X., Tang, L., Chen, J., Wang, F. et Zhang, D. (2020). EEG responses to emotional videos can quantitatively predict big-five personality traits. *Neurocomputing*, 415, 368-381. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.123>
- Liu, Y., Ding, Y., Li, C., Cheng, J., Song, R., Wan, F. et Chen, X. (2020). Multi-channel EEG-based emotion recognition via a multi-level features guided capsule network. *Computers in Biology and Medicine*, 123, 103927. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2020.103927>
- Loewenstein, G. et Lerner, J. S. (2003). The role of affect in decision making. Dans R. Davidson, H. Goldsmith et K. Scherer (dir.), *Handbook of Affective Science* (p. 619-642). Oxford University Press.
- Loh, W. (2011). Classification and regression trees. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 1(1), 14-23. <https://doi.org/10.1002/widm.8>
- Lorenzo, G., Lledó, A., Pomares, J. et Roig, R. (2016). Design and application of an immersive virtual reality system to enhance emotional skills for children with autism spectrum disorders. *Computers & Education*, 98, 192-205. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.03.018>
- McFarland, D. J., Sarnacki, W. A. et Wolpaw, J. R. (2010). Electroencephalographic (EEG) control of three-dimensional movement. *Journal of Neural Engineering*, 7(3), 036007. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/7/3/036007>
- Mega, C., Ronconi, L. et De Beni, R. (2014). What makes a good student? How emotions, self-regulated learning, and motivation contribute to academic achievement. *Journal of Educational Psychology*, 106(1), 121-131. <https://doi.org/10.1037/a0033546>
- Meidenbauer, K. L., Stenfors, C. U. D., Young, J., Layden, E. A., Schertz, K. E., Kardan, O., Decety, J. et Berman, M. G. (2019). The gradual development of the preference for natural environments. *Journal of Environmental Psychology*, 65, 101328. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2019.101328>

- Meshulam, R. I., Moberg, P. J., Mahr, R. N. et Doty, R. L. (1998). Olfaction in neurodegenerative disease: a meta-analysis of olfactory functioning in Alzheimer's and Parkinson's diseases. *Archives of neurology*, 55(1), 84-90.
- Monteiro, D., Liang, H.-N., Xu, W., Brucker, M., Nanjappan, V. et Yue, Y. (2018). Evaluating enjoyment, presence, and emulator sickness in VR games based on first- and third- person viewing perspectives: Effect of Viewing Perspective in VR Gaming. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 29(3-4), e1830. <https://doi.org/10.1002/cav.1830>
- Moss, D. (2002). Biofeedback. Dans *Handbook of Complementary and Alternative Therapies in Mental Health* (p. 135-158). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012638281-5/50008-5>
- Oltu, B., Akşahin, M. F. et Kibaroglu, S. (2021). A novel electroencephalography based approach for Alzheimer's disease and mild cognitive impairment detection. *Biomedical Signal Processing and Control*, 63, 102223. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102223>
- Papez, J. W. (1937). A PROPOSED MECHANISM OF EMOTION. *Archives of Neurology And Psychiatry*, 38(4), 725. <https://doi.org/10.1001/archneurpsyc.1937.02260220069003>
- Peck, K. J., Girard, T. A., Russo, F. A. et Fiocco, A. J. (2016). Music and memory in Alzheimer's disease and the potential underlying mechanisms. *Journal of Alzheimer's disease*, 51(4), 949-959.
- Pedraza-Hueso, M., Martín-Calzón, S., Díaz-Pernas, F. J. et Martínez-Zarzuela, M. (2015). Rehabilitation Using Kinect-based Games and Virtual Reality. *Procedia Computer Science*, 75, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.233>
- Peña, C., Marzo, J.-L. et Rosa, J. D. L. (2002). *Intelligent Agents in a Teaching and Learning Environment on the Web*.
- Phelps, E. A. (2004). Human emotion and memory: interactions of the amygdala and hippocampal complex. *Current Opinion in Neurobiology*, 14(2), 198-202. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2004.03.015>



- Pitaloka, D. A., Wulandari, A., Basaruddin, T. et Liliana, D. Y. (2017). Enhancing CNN with Preprocessing Stage in Automatic Emotion Recognition. *Procedia Computer Science*, 116, 523-529. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.10.038>
- RajMohan, V. et Mohandas, E. (2007). The limbic system. *Indian Journal of Psychiatry*, 49(2), 132. <https://doi.org/10.4103/0019-5545.33264>
- Rathbone, C. J., Moulin, C. J. et Conway, M. A. (2008). Self-centered memories: The reminiscence bump and the self. *Memory & cognition*, 36(8), 1403-1414.
- Ray, K. D. et Mittelman, M. S. (2017). Music therapy: A nonpharmacological approach to the care of agitation and depressive symptoms for nursing home residents with dementia. *Dementia*, 16(6), 689-710.
- Rolls, E. T. (2015). Limbic systems for emotion and for memory, but no single limbic system. *Cortex*, 62, 119-157. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.12.005>
- Rose, F. D., Brooks, Barbara. M. et Rizzo, A. A. (2005). Virtual Reality in Brain Damage Rehabilitation: Review. *CyberPsychology & Behavior*, 8(3), 241-262. <https://doi.org/10.1089/cpb.2005.8.241>
- Rugaber, S., Goel, A. K. et Martie, L. (2013). GAIA: A CAD Environment for Model-Based Adaptation of Game-Playing Software Agents. *Procedia Computer Science*, 16, 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.01.004>
- Russell, S. J. et Norvig, P. (1995). *Artificial intelligence: a modern approach*. Prentice Hall.
- Salen, K. T. et Zimmerman, E. (2010). *Rules of play: game design fundamentals*. MIT Press.
- Schaler, K. (2009). *Travel Therapy: Where Do You Need to Go?* Seal Press.
- Sherlin, L. H., Arns, M., Lubar, J., Heinrich, H., Kerson, C., Strehl, U. et Serman, M. B. (2011). Neurofeedback and Basic Learning Theory: Implications for Research and Practice. *Journal of Neurotherapy*, 15(4), 292-304. <https://doi.org/10.1080/10874208.2011.623089>
- Sherman, S. (2006). Thalamus. *Scholarpedia*, 1(9), 1583. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.1583>

- Slot, R. E., Sikkes, S. A., Berkhof, J., Brodaty, H., Buckley, R., Cavedo, E., Dardiotis, E., Guillo-Benarous, F., Hampel, H. et Kochan, N. A. (2019). Subjective cognitive decline and rates of incident Alzheimer's disease and non-Alzheimer's disease dementia. *Alzheimer's & Dementia*, *15*(3), 465-476.
- Soleymani, M., Asghari-Esfeden, S., Pantic, M. et Fu, Y. (2014, juillet). *Continuous emotion detection using EEG signals and facial expressions* (p. 1-6). <https://doi.org/10.1109/ICME.2014.6890301>
- Song, S. et Yamada, S. (2019). Ambient Lights Influence Perception and Decision-Making. *Frontiers in Psychology*, *9*, 2685. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02685>
- Tennant, M., Youssef, G. J., McGillivray, J., Clark, T.-J., McMillan, L. et McCarthy, M. C. (2020). Exploring the use of Immersive Virtual Reality to enhance Psychological Well-Being in Pediatric Oncology: A pilot randomized controlled trial. *European Journal of Oncology Nursing*, *48*, 101804. <https://doi.org/10.1016/j.ejon.2020.101804>
- Tsoi, K. K., Chan, J. Y., Ng, Y.-M., Lee, M. M., Kwok, T. C. et Wong, S. Y. (2018). Receptive music therapy is more effective than interactive music therapy to relieve behavioral and psychological symptoms of dementia: a systematic review and meta-analysis. *Journal of the American Medical Directors Association*, *19*(7), 568-576.
- Valdez, P. et Mehrabian, A. (1994). Effects of color on emotions. *Journal of experimental psychology: General*, *123*(4), 394.
- Van Doren, J., Heinrich, H., Bezold, M., Reuter, N., Kratz, O., Horndasch, S., Berking, M., Ros, T., Gevensleben, H., Moll, G. H. et Studer, P. (2017). Theta/beta neurofeedback in children with ADHD: Feasibility of a short-term setting and plasticity effects. *International Journal of Psychophysiology*, *112*, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2016.11.004>
- Van Krevelen D.W. F. (2009). *Intelligent Agent Modeling Games Strategy Tutoring in Operations Management*. Delft University of technology.
- Vink, A. C., Bruinsma, M. S. et Scholten, R. J. (2003). Music therapy for people with dementia. *Cochrane database of systematic reviews*, (4).

- Walsh, K. R. et Pawlowski, S. D. (2002). Virtual Reality: A Technology in Need of IS Research. *Communications of the Association for Information Systems*, 8, 296-314. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.00820>
- WILSON, E. O. (1984). *Biophilia*. Harvard University Press.
- Ye, D., He, Q., Wang, Y. et Yang, Y. (2018). An agent-based service adaptation approach in distributed multi-tenant service-based systems. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 122, 11-25. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2018.07.006>
- Ye, Q., Ben Abdesslem, H. et Boukadida, M. (2020). Hypocrates+: A Virtual Reality Medical Education Platform with Intelligent Real-Time Help System. Dans C. Frasson, P. Bamidis et P. Vlamos (dir.), *Brain Function Assessment in Learning* (vol. 12462, p. 96-101). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60735-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60735-7_10)
- Zhang, Y., Cai, J., An, L., Hui, F., Ren, T., Ma, H. et Zhao, Q. (2017). Does music therapy enhance behavioral and cognitive function in elderly dementia patients? A systematic review and meta-analysis. *Ageing research reviews*, 35, 1-11.
- Zhu, L., Su, C., Zhang, J., Cui, G., Cichocki, A., Zhou, C. et Li, J. (2020). EEG-based approach for recognizing human social emotion perception. *Advanced Engineering Informatics*, 46, 101191. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101191>



# Publications

## Article de Journaux

- **Ben Abdessalem, H.**, Byrns, A. and Frasson, C. (2021) Optimizing Alzheimer's Disease Therapy Using a Neural Intelligent Agent-Based Platform. International Journal of Intelligence Science, 11, 70-96. doi: 10.4236/ijis.2021.112006
- Byrns, A., **Ben Abdessalem, H.**, Cuesta, M., Bruneau, M., Belleville, S. and Frasson, C. (2020) EEG Analysis of the Contribution of Music Therapy and Virtual Reality to the Improvement of Cognition in Alzheimer's Disease. Journal of Biomedical Science and Engineering, 13, 187-201. doi: 10.4236/jbise.2020.138018
- Ghali, R., **Ben Abdessalem, H.**, Frasson, C. and Nkambou, R. (2018) Identifying Brain Characteristics of Bright Students. Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, 10, 93-103. doi: 10.4236/jilsa.2018.103006

## Article de Conférences

- **Ben Abdessalem, H.**, and Frasson, C. (Submitted) Toward personalizing Alzheimer's Disease Therapy using an Intelligent Cognitive Control System. NIDS 2021, 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON NOVELTIES IN INTELLIGENT DIGITAL SYSTEMS. Athens, Greece, Sept 30- Oct 1, 2021.
- Aghajani, M., **Ben Abdessalem, H.**, Frasson, C. (Accepted) Voice Emotion Recognition in Real Time Applications. ITS 2021, 17<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Tutoring Systems. Athens, Greece, June 7-11, 2021.

- Dare, K., **Ben Abdessalem, H.**, Frasson, C. (Accepted) Extraction of 3D Pose in Video for Building Virtual Learning Avatars. ITS 2021, 17<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Tutoring Systems. Athens, Greece, June 7-11, 2021.
- Orthlieb, T., **Ben Abdessalem, H.**, Frasson, C. (Accepted) Checking Method for Fake News to Avoid the Twitter Effect. ITS 2021, 17<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Tutoring Systems. Athens, Greece, June 7-11, 2021. [Poster]
- **Ben Abdessalem, H.**, Kibbanahalli Shivalingappa M.S., Frasson, C. Virtual Reality Zoo Therapy for Alzheimer's Disease Using Real-time Gesture Recognition. GeNeDis 2020, A worldwide congress on Genetics, Geriatrics and Neurodegenerative Diseases Research. Crete, Greece, October 8-11, 2020.
- Kibbanahalli Shivalingappa M.S., **Ben Abdessalem, H.**, Frasson, C. Real-time Gesture Recognition Using Deep Learning Towards Alzheimer's Disease Applications. BFAL 2020, The 2nd International Conference on Brain Function Assessment in Learning, Crete, Greece, October 9-11, 2020.
- Ye, Q., **Ben Abdessalem, H.**, Boukadida, M. Hypocrates+: A Virtual Reality Medical Education Platform with Intelligent Real-time Help System. BFAL 2020, The 2nd International Conference on Brain Function Assessment in Learning, Crete, Greece, October 9-11, 2020.
- Dakoure, C., **Ben Abdessalem, H.**, Boukadida, M., Byrns, A., Cuesta, M., Bruneau, M.A., Belleville, S., Frasson, C. Virtual Savannah: an Effective Therapeutic and Relaxing Treatment for People with Subjective Cognitive Decline. BFAL 2020, The 2nd International Conference on Brain Function Assessment in Learning, Crete, Greece, October 9-11, 2020.
- Jha, M.K., **Ben Abdessalem, H.**, Boukadida, M., Byrns, A., Cuesta, M., Bruneau, M.A., Belleville, S., Frasson, C. Immersive Orientation Game for Alzheimer's Disease using Real-time Help System. BFAL 2020, The 2nd International Conference on Brain Function Assessment in Learning, Crete, Greece, October 9-11, 2020.
- Byrns, A., **Ben Abdessalem, H.**, Cuesta, M., Bruneau, M.A., Belleville, S., Frasson, C. Adaptive Music Therapy for Alzheimer's Disease using Virtual Reality. ITS 2020, The 16th Intelligent Tutoring Systems Conference, Athens, Greece, June 8-12, 2020.

- Jha, M.K., Boukadida, M., **Ben Abdessalem, H.**, Byrns, A., Bruneau, M.A., Belleville, S., Frasson, C. Improving Cognitive and Emotional State Using 3D Virtual Reality Orientation Game. ITS 2020, The 16th Intelligent Tutoring Systems Conference, Athens, Greece, June 8-12, 2020.
- **Ben Abdessalem, H.**, Byrns, A., Cuesta, M., Manera, V., Robert, P., Bruneau, M.A., Belleville, S., Frasson, C. Application of Virtual Travel for Alzheimer’s Disease. SENSORNET 2020, the 9th International Conference on Sensor Networks, Valletta, Malta, 28-29 February 2020.
- **Ben Abdessalem, H.**, Boukadida, M., Manera, V., Bruneau, M.A., Robert, P., Belleville, S., David, R., Frasson, C. Immersion en train thérapeutique pour la relaxation de patients Alzheimer. CFP 2019, La 11ème edition du Congrès Français de Psychiatrie, Nice, France 4-7 Decembre 2019. [Poster]
- **Ben Abdessalem, H.**, Chaouachi, M., Boukadida, M., Frasson, C. Toward real-time system adaptation using eye tracking’s excitement. ITS 2019, The 15th Intelligent Tutoring Systems Conference, Kingston, Jamaica, June 3-7 2019.
- **Ben Abdessalem, H.**, Chaouachi, M., Boukadida, M., Frasson, C. How do Players’ Eye Movements Relate to their Excitement in a VR adaptive Game? Flairs 32, The Thirty Second International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference, Florida, USA, May 19-22, 2019.
- **Ben Abdessalem, H.**, Boukadida M., Frasson, C. Emotional state and behavior analysis in a virtual reality environment: a medical application. ITS 2018, The 14th Intelligent Tutoring Systems Conference, Montreal, CANADA, June 13-15, 2018.
- **Ben Abdessalem, H.** Analysis and Optimization of Brain Behavior in a Virtual Reality Environment. ITS 2018, The 14th Intelligent Tutoring Systems Conference, Montreal, CANADA, June 13-15, 2018. [Doctoral Consortium]
- Boukadida M., **Ben Abdessalem, H.**, Frasson, C. “Hypocrates”: Virtual Reality and Emotions Analysis towards a Personalized Learning. ITS 2018, The 14th Intelligent Tutoring Systems Conference, Montreal, CANADA, June 13-15, 2018. [Poster]

- **Ben Abdessalem, H.**, Boukadida M., Frasson, C., Virtual Reality Game Adaptation using Neurofeedback. Flairs 31, The Thirty First International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference, Florida, USA, May 21-23, 2018.
- **Ben Abdessalem, H.**, Frasson, C. Real-time Brain Assessment for Adaptive Virtual Reality Game: A Neurofeedback Approach. BFAL 2017, The First International Conference on Brain Function Assessment in Learning, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer Verlag 10512, Patras, Greece, September 24-25, 2017.
- Ghali R., **Ben Abdessalem, H.**, Frasson, C. Improving Intuitive Reasoning Through Assistance Strategies in a Virtual Reality Game. Flairs 30, The Thirtieth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference, Florida, USA, May 22-24, 2017.