



HAL
open science

Impact sur l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif de l'utilisation d'objets connectés portés pour la rétroaction physiologique

Samory Houzangbe

► To cite this version:

Samory Houzangbe. Impact sur l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif de l'utilisation d'objets connectés portés pour la rétroaction physiologique. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2019. Français. NNT : 2019ENAM0011 . tel-02150593

HAL Id: tel-02150593

<https://pastel.hal.science/tel-02150593>

Submitted on 7 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité “ Génie industriel – Conception & Innovation ”

présentée et soutenue publiquement par

Samory HOUZANGBE

le 12 mars 2019

**Impact sur l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif de
l'utilisation d'objets connectés portés pour la rétroaction physiologique**

Directeur de thèse : **Simon RICHIR**

Co-encadrement de la thèse : **Olivier CHRISTMANN**

Jury

Mme Catherine PELACHAUD, Directrice de recherche, CNRS, ISIR, UPMC

Mme Domitile LOURDEAUX, Maître de conférences - HDR, Heudiasyc UMR CNRS, UTC

M. Jean-Claude MARTIN, Professeur des universités, LIMSI-CNRS, Université Paris Sud

M. Guillaume BOUYER, Maître de conférences, IBISC, Université d'Evry Val d'Essonne

M. Olivier CHRISTMANN, Maître de conférences, LAMPA - PI, ENSAM

M. Simon RICHIR, Professeur des universités, LAMPA - PI, ENSAM

M. David PERRET, Docteur, EON Reality SAS

Présidente
Rapporteuse
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Invité

T
H
È
S
E

Résumé

Les objets connectés ont aujourd’hui pénétré les foyers et, poussés par une société tournée de plus en plus vers le bien-être, ces capteurs sont dorénavant en capacité de mesurer une grande variété de données physiologiques. L’arrivée à maturité des technologies de la réalité virtuelle, couplée avec l’avènement des objets connectés, permet et favorise dès lors de nouvelles perspectives dans la proposition d’expériences immersives enrichies. De nombreux travaux dans le domaine de la réalité virtuelle rapportent l’exploitation des signaux physiologiques. Ceux-ci se basent principalement sur du matériel médical, qui possède des contraintes d’utilisation fortes, reste souvent encombrant et limite de fait la mobilité des utilisateurs. Pour tenter de pallier ces limites, nos travaux se concentrent donc sur l’utilisation originale des *wearables* (objets connectés portés) comme substituts aux capteurs physiologiques traditionnels dans le cadre d’applications immersives. Ce travail de thèse propose à la fois une réflexion fondamentale sur l’expérience utilisateur (UX) et une étude de faisabilité technologique.

Dans ce contexte, l’objectif de nos recherches est de contribuer à la connaissance concernant l’impact de l’utilisation des données physiologiques dans des environnements virtuels immersifs. Nous étudierons en particulier l’influence d’un *biofeedback* cardiaque, *via* des capteurs connectés grand public, sur l’engagement utilisateur et le sentiment d’agentivité. Nous avons ainsi mené deux expérimentations nous permettant d’étudier l’impact des différentes modalités de *biofeedback* sur l’expérience utilisateur. Notre première expérimentation met en place un *biofeedback* cardiaque dans un jeu d’horreur en réalité virtuelle, influant sur la difficulté du jeu. Les résultats de cette expérimentation renforcent l’intérêt de l’utilisation de capteurs connectés comme moyen de captation physiologique dans des expériences de réalité virtuelle immersive. Ils mettent également en avant l’impact positif de ce *biofeedback* sur l’expérience utilisateur par son influence sur l’engagement. La deuxième expérience porte sur l’utilisation de l’activité cardiaque comme une mécanique d’interaction obligatoire. Elle est composée de deux parties, la première permettant de quantifier le niveau de compétence des participants dans le contrôle de leur activité cardiaque et la seconde les plongeant dans une suite de tâches en réalité virtuelle où le contrôle cardiaque est nécessaire pour les réussir. L’analyse des résultats d’expérience montre la possibilité d’utiliser cette mécanique d’interaction pour des expériences virtuelles immersives et explicite un impact positif sur le sentiment d’agentivité. Sur un plan théorique, cette thèse propose une synthèse des modèles de l’expérience utilisateur en environnement virtuel et soumet les bases d’un modèle de « l’immersion physiologique ».

Mots clés : *Réalité virtuelle ; Biofeedback ; Internet des objets ; Engagement ; Agentivité.*

Abstract

The internet of things has now entered every home and, with a society more and more focused towards wellness, these sensors measure and offer henceforth a wide variety of physiological data. Virtual reality technologies reaching maturity, coupled with the advent of the internet of things, allow consequently new opportunities to propose improved immersive experiences. If we identify nowadays many virtual reality studies reporting the usage of physiological data, they mainly use medical equipment, which poses strong usability constraints, is often cumbersome and limits mobility. In an attempt to overcome these limitations, this study therefore focuses on the original usage of smart wearables as substitutes for traditional sensors in immersive applications. Thus, this thesis proposes both a fundamental user experience (UX) study and a technological feasibility study.

In this context, the objective of our study is to contribute to knowledge about the impact of the use of physiological data in immersive virtual environments. More precisely, the impact of biofeedback, via off-the-shelf smart wearables, on user engagement and the sense of agency. We have thus carried out two experiments allowing us to study the impacts of the different biofeedback modalities on user experience. Our first experiment implements a biofeedback based on heart rate in a virtual reality horror game, influencing the game difficulty. The results of this experiment reinforce the interest of using smart wearables to capture physiological data for immersive virtual reality experiences. They also highlight the positive impact of this biofeedback on user engagement. The second experiment focuses on the use of cardiac activity as a mandatory interaction mechanism. This experiment is composed of two parts, the first one quantifying the participants' level of competency in heartrate control and the second one immersing them in a series of tasks in virtual reality; heartrate control is necessary to complete the different steps of the experience. The results of this experiment demonstrate the possibility of using the said interaction mechanic for virtual reality experiences and indicate a positive impact on the sense of agency. On a theoretical level, this thesis proposes a synthesis of user experience models in virtual environment and submit the foundations of a model of "physiological immersion".

Keywords : *Virtual reality ; Biofeedback ; Internet of things ; Engagement ; Agency.*

Remerciements

Je souhaiterais dans un premier temps adresser mes remerciements au Pr Simon Richir pour la confiance qu'il m'a accordée dans la poursuite de ces travaux de thèse. Lui et l'ensemble des membres de l'équipe Présence et Innovation m'ont accompagné dans mes recherches de la meilleure manière qui soit. Je tiens aussi à remercier la société EON Reality SAS, qui a rendu cette thèse possible par son financement et son encadrement. Toutes les équipes d'EON et plus particulièrement les docteurs Gaëlle Pénelon et David Perret, pour leur soutien indéfectible m'ayant permis de poursuivre librement mes travaux et mes aspirations. Je souhaiterais aussi remercier Thierry Frey pour ses conseils et son aide au court de cette thèse.

Sur un plan personnel, j'aimerais remercier mes parents, mon frère, ma sœur et leurs compagnons pour leur soutien indéfectible et leur capacité à me faire rire dans les moments de doutes. Je voudrais aussi remercier les « musclés d'EON », pour leur bonne humeur quotidienne durant ces trois années. Je remercie tous mes amis pour m'avoir soutenu tout au long de ce parcours. Ceux ayant traversé des continents et des océans pour être à mes côtés lors de ma soutenance. L'équipe du LFL, Ines, Axel, Marjoric, Marine, Delassi, Joy, Houda, les kilomètres ne nous ont jamais séparé. Ceux dont l'affection les poussaient à s'inquiéter de moins profiter de moi si je quittais Paris, Antoine, Florence, Damien, Ariane, Elodie, Sylvain et tous les autres. Le « Rhum's plan », pour les brunchs, soirées, mariages et tous les incroyables moments partagés. Ainsi qu'à toi Marià, toi qui a été la première à me pousser à faire le grand saut vers cette nouvelle aventure. À Manu et André, les couzos, c'est bon j'ai terminé les études. À vous tous, qui avez toujours été là pour moi.

Enfin je souhaiterais adresser un remerciement particulier à trois personnes. Au Dr Héléne Gitchenko, qui par son esprit vif et son humour dévastateur a égayé un moment de cette thèse et poussé ma réflexion plus loin. Au Dr Geoffrey Gorisse, mon « frère de thèse », ça n'a pas toujours été simple de te canaliser mais partager ce bureau pendant trois ans avec toi a été un plaisir véritable et avoir la chance de travailler avec un esprit aussi brillant, un honneur et une source d'inspiration. Enfin au Dr Olivier Christmann, un travailleur de l'ombre, trop peu mis sur le devant de la scène tant ses contributions sont immenses, je n'aurais pu souhaiter de meilleur encadrant. Tu as toujours su mettre en avant tes étudiants et le travail que nous effectuons. Ton sens du sacrifice, ta rigueur pour faire de nous de meilleurs chercheurs et ton humanité font de toi l'encadrant idéal et le camarade de bureau rêvé. Merci pour tout.

Merci du fond du cœur à toutes et à tous, cette thèse est aussi la vôtre,

Samory

Publications

Journaux internationaux à comité de lecture

Houzangbe, S., Christmann, O., Gorisse, G., and Richir, S. (2019). Effects of Voluntary Heart Rate Control on User Engagement and Agency in Virtual Reality. **En cours de revue.** *Virtual Reality, Springer.*

Houzangbe, S., Christmann, O., Gorisse, G., and Richir, S. (2019). From Physiology to Presence : Proposition of the "Physiological Immersion" model. **En cours de revue.** *The International Journal of Virtual Reality.*

Gorisse, G., Christmann, O., Houzangbe, S., and Richir, S. (2019). From robot to virtual doppelganger : impact of avatar visual fidelity on the Sense of Embodiment and Behavior in Immersive Virtual Environments. *Frontiers in Robotics and AI.*

Actes de conférences internationales

Houzangbe, S., Christmann, O., Gorisse, G. and Richir, S. (2019). Poster : Effects of Voluntary Heart Rate Control on User Engagement in Virtual Reality. *In Proceedings of the 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interface, IEEE VR '19, Osaka, Japan.*

Houzangbe, S., Christmann, O., Gorisse, G. and Richir, S. (2018). Fear As a Biofeedback Game Mechanic in Virtual Reality : Effects on Engagement and Perceived Usability. *In Proceedings of the 13th International Conference on the Foundations of Digital Games, FDG '18, ACM, New York NY, USA.*

Gorisse, G., Christmann, O., Houzangbe, S. and Richir, S. (2018). From robot to virtual doppelganger : impact of avatar visual fidelity and self-esteem on perceived attractiveness. *In Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI '18, ACM, New York NY, USA.*

Houyangbe, S., Christmann, O., Gorisse, G. and Richir, S. (2018). Integrability and Reliability of Smart Wearables in Virtual Reality Experiences : A Subjective Review. *In Proceedings of the 2018 Virtual Reality International Conference, VRIC '18, ACM, New York NY, USA.*

Pénelon, G., Houyangbe, S. and Baey, V. (2017). LEXYZ - Experimenting Augmented and Virtual Reality Technologies at School : Student at the Center of the Learning Experience. *In Industrial tracks of the 14th annual EuroVR Conference, EuroVR '17.*

Table des matières

Table des matières	xv
Liste des figures	xxi
Liste des tableaux	xxv
1 Introduction	1
1.1 Motivation	2
1.2 Questions et périmètre de recherche	4
1.3 Plan du mémoire	7
2 État de l’art	11
2.1 Expérience utilisateur	12
2.1.1 Présence et émotions	13
2.1.2 De la présence à l’engagement	17
2.1.3 Agentivité	21
2.2 Données physiologiques pour des boucles de rétroaction biologique	25
2.2.1 Physiologie et émotions	25
2.2.2 Rétroaction physiologique ou <i>biofeedback</i>	30
2.2.3 Auto-efficacité	32
2.2.4 Le <i>biofeedback</i> comme interface d’interaction	35
2.3 Les objets connectés comme plateforme mobile de suivi de données physiologiques	45
2.4 Résumé de l’état de l’art	51
2.5 Hypothèses et déroulement des travaux	54
3 Méthodologie	59
3.1 Études empiriques	60
3.2 Typologies des méthodes	61
3.2.1 Méthodes quantitatives	61

3.2.2	Méthodes qualitatives	65
4	Expérimentation 1 : la peur comme mécanique de jeu physiologique en réalité virtuelle	67
4.1	Résumé	68
4.2	Objectif et activité proposée	69
4.3	Matériel et méthodes	71
4.3.1	Appareillage	71
4.3.2	Jeu virtuel	72
4.3.3	Variables et mesures	75
4.3.4	Procédure expérimentale	75
4.3.5	Participants	78
4.3.6	Hypothèses	78
4.4	Résultats	79
4.4.1	Contrôle du rythme cardiaque	79
4.4.2	Utilisabilité perçue	81
4.4.3	Implication ressentie	82
4.4.4	Nouveauté	84
4.4.5	Fiabilité et confort	84
4.4.6	Jugements subjectif et préférences	86
4.5	Discussion	87
4.6	Limitations	90
5	Expérimentation 2.1 : quantifier le contrôle volontaire du rythme cardiaque	93
5.1	Résumé	94
5.2	Objectif et activité proposée	95
5.3	Matériel et méthodes	96
5.3.1	Système	96
5.3.2	Étude utilisateur	96
5.3.3	Variables et mesures	98
5.4	Résultats	100
5.5	Discussion	101
6	Expérimentation 2.2 : contrôle volontaire de la fréquence cardiaque dans une expérience de réalité virtuelle	103
6.1	Résumé	104

6.2	Objectif et activité proposée	105
6.3	Matériel et méthodes	107
6.3.1	Appareillage	107
6.3.2	Influence des données physiologiques	107
6.3.3	Jeu en réalité virtuelle	108
6.3.4	Participants	111
6.3.5	Variables et mesures	112
6.3.6	Procédure expérimentale	115
6.3.7	Hypothèses	115
6.4	Résultats	116
6.4.1	Utilisabilité perçue	116
6.4.2	Implication ressentie	117
6.4.3	Gratification Personnelle	118
6.4.4	Concentration	119
6.4.5	Agentivité	120
6.4.6	Résultats objectifs	121
6.5	Discussion	122
6.6	Discussion générale	125
6.7	Limitations	127
7	Conclusion	129
7.1	Introduction	130
7.2	Réponses aux questions de recherche et discussion des hypothèses	132
7.2.1	Avantages et limitations de l’outil connecté	132
7.2.2	Le <i>biofeedback</i> comme mécanique d’interaction	133
7.2.3	Augmenter l’expérience utilisateur	135
7.3	Contributions à la connaissance	138
7.4	Limites	139
7.5	Travaux futurs	141
	Bibliographie	145
A	Annexes à l’expérimentation 1	167
A.1	Relevés cardiaques des participants lors de la passation avec <i>biofeedback</i>	168
A.2	Guide d’entretien post-passation	172

B Annexes à l'expérimentation 2.2	175
B.1 Figures complémentaires	176
B.2 Guide d'entretien post-passation	177

Liste des figures

2.1	Modèle de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif par Tcha-Tokey <i>et al.</i> [2016] (NI : Niveau d'Interaction ; FI : Fréquence d'Image ; LCV : Largeur du Champ de Vision ; EP : Expérience Précédente)	13
2.2	Modèle circomplexe de la valence-stimulation	15
2.3	Illustration des intrications entre les sentiments de présence et d'engagement	21
2.4	Meta-modèle « Présence - Incarnation » développé par Gorisse <i>et al.</i> [2018] .	23
2.5	Enneagramme des personnalités	25
2.6	Illustration schématique du <i>biofeedback</i>	31
2.7	Illustration des intrications entre le <i>biofeedback</i> et les sentiments de présence et d'engagement	37
2.8	Illustration des intrications entre le <i>biofeedback</i> et les sentiments d'agentivité et d'auto-efficacité physiologique	42
2.9	Modèle théorique « immersion physiologique »	44
2.10	Schématisation du potentiel de captation des <i>wearables</i>	45
2.11	Espace de design des objets connectés proposé par Hänsel <i>et al.</i> [2018] (traduction libre). Il compare le kit de mesure scientifique Nexus 10 (https://www.mindmedia.com), la ceinture pectorale de captation cardiaque Polar H7 (www.polar.com) et les montres connectées Apple Watch (www.apple.com/watch) et Microsoft Band 2.	47
2.12	Exemples de <i>wearables</i> . Le bracelet de captation cardiaque Mio LINK ©Mio Global 2015 (2.12a). Les chaussures de course connectées UA HOVR™ <i>Phantom Connected</i> ©Under Armor 2018 (2.12b). Le tee-shirt de captation biométrique pour le sport <i>Athos Shirt</i> ©Mad Apparel, Inc 2018.	48
4.1	Illustration de la créature présente dans notre jeu en réalité virtuelle, que le joueur doit esquiver afin de survivre	68

4.2	Illustration des intrications entre le <i>biofeedback</i> et les sentiments de présence et d'engagement	70
4.3	La configuration complète utilisée pour les expérimentations.	71
4.4	Différents points de vue de la pièce principale du manoir dans laquelle le joueur est confiné.	73
4.5	Graphique représentant l'augmentation de la difficulté, due aux modifications de l'environnement, en fonction de l'état physiologique du joueur.	74
4.6	Graphiques représentant l'évolution des relevés de rythme cardiaque (en BPM en fonction du temps en secondes) de trois participants durant la passation avec <i>biofeedback</i> . La première ligne horizontale représente la valeur calibrée, la seconde représente la valeur calibrée plus 15 BPM et la troisième représente la valeur calibrée plus 30 BPM. (a) Le participant a rapporté ne pas avoir essayé de contrôler son rythme cardiaque. (b) Le participant a rapporté avoir essayé de contrôler son rythme cardiaque à de multiples reprises durant l'expérience. (c) Le participant a rapporté avoir essayé de contrôler son rythme cardiaque une ou deux fois durant l'expérience.	80
4.7	Retours subjectifs sur l'utilisabilité perçue de l'application, divisés en deux groupes : sans <i>biofeedback</i> (NBF) et avec <i>biofeedback</i> (BF).	81
4.8	Retours subjectifs sur l'implication ressentie.	83
4.9	Graphiques des valeurs de rythme cardiaque de chaque participant, enregistré lors de la passation avec <i>biofeedback</i>	85
5.1	Illustration de l'application utilisée pour la de quantification du contrôle cardiaque, seconde phase : respiration et accommodation.	94
5.2	Illustrations de l'application mise en place pour la quantification du contrôle cardiaque.	96
5.3	Distribution du temps moyen passé dans la zone cible durant l'expérience par les participants.	100
6.1	Illustration de l'environnement virtuel mis en place pour la réalisation de la deuxième expérimentation, concernant l'utilisation d'un <i>biofeedback</i> cardiaque comme mécanique d'interaction obligatoire.	104
6.2	Illustration des intrications entre le <i>biofeedback</i> et les sentiments d'agentivité, d'auto-efficacité physiologique et d'engagement	105
6.3	Images des différentes salles du jeu en réalité virtuelle développé pour la seconde étude.	110

7.1	Modèle théorique « immersion physiologique »	137
A.4	Graphiques représentant les relevés de rythme cardiaque (en BPM) des participants durant la passation avec rétroaction biologique. Rythme cardiaque (BPM) dans le temps (secondes).	171
B.1	Images des salles du jeu en réalité virtuelle développé pour la seconde étude.	176

Liste des tableaux

3.1	Synthèse des questionnaires permettant l'évaluation des différents facteurs de l'engagement utilisateur, répartis en fonction des facteurs les plus souvent présents dans les modèles observés. Les autres dimensions pertinentes pour notre étude sont listées dans une colonne additionnelle.	64
4.1	Questionnaire post-expérience composé de 6 dimensions : Nouveauté - NO ; Utilisabilité perçue - PU ; Implication ressentie - FI ; Concentration - FA ; <i>Wearable</i> - WR ; Comparaison - CP.	76
4.2	Scores de nouveauté rapportée.	84
6.1	Questionnaire post-expérience composé de 5 dimensions : Utilisabilité perçue -PU ; Implication ressentie - FI ; Satisfaction personnelle - PG ; Concentration - FA ; Agentivité - AG. <i>*Les résultats de ces questions sont inversés (plus le score est élevé, plus le résultat est positif)</i>	114
6.2	Résumé statistique des réponses au questionnaire post-expérimentation concernant l'utilisabilité perçue.	116
6.3	Résumé statistique des réponses au questionnaire post-expérimentation concernant l'implication.	118
6.4	Résumé statistique des réponses au questionnaire post-expérimentation concernant la gratification personnelle.	119
6.5	Résultats du test de Wilcoxon sur la concentration (Question FA3).	119
6.6	Résumé statistique des réponses au questionnaire post-expérimentation concernant l'agentivité.	120
A.1	Guide d'entretien post-passation de l'expérimentation 1.	172
B.1	Guide d'entretien post-passation de l'expérimentation 2.2.	177

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Motivation	2
1.2	Questions et périmètre de recherche	4
1.3	Plan du mémoire	7

1.1 Motivation

Après un passage dans le creux de la courbe du cycle de la *hype* de Gartner¹, la Réalité Virtuelle (RV) est de nouveau sur le devant de la scène. Elle est maintenant devenue un support de premier ordre dans l'évolution des médias créatifs.

Chaque personne possédant un smartphone pourra bientôt avoir accès à des expériences de réalité virtuelle de haute qualité. Si nous pouvons admettre que l'immersion visuelle fournie par un casque de RV mobile (*cardboard*) est proche de celle des casques « classiques », un composant fondamental, et garant d'une expérience de qualité, manque encore : l'interaction. En effet, les casques classiques sont équipés de contrôleurs (manettes et système de suivi de mouvements *Roomscale*² pour le *HTC Vive*³ et les *Oculus Touch*⁴ pour l'*Oculus*⁵), mais les plateformes mobiles n'offrent pas de schèmes d'interactions directs et naturels. Ils se reposent principalement sur de la commande visuelle (*Gaze*) pour interagir avec les différents éléments de l'environnement, rendant cette interaction artificielle et limitant sévèrement l'expérience utilisateur (*User Experience* ou UX). Cependant, les smartphones sont ancrés dans un très large écosystème qui peut offrir des solutions intéressantes aux limites de l'interaction dans des plateformes de RV mobile : l'Internet des Objets. Ce concept florissant devrait atteindre, selon Evans [2011], les 50 milliards d'objets connectés déployés d'ici 2020, et selon une projection du cabinet Juniper Research [2013] le bilan des ventes d'outils connectés de fitness s'élèvera à 110 millions pour l'année 2018.

C'est pourquoi la société *EON Reality SAS*, spécialiste de la réalité virtuelle et augmentée pour l'éducation et le divertissement, cherche à optimiser ses systèmes immersifs, de façon conjointe au développement de ses propres contenus. Son objectif principal, dans le cadre de cette recherche, est d'améliorer l'expérience utilisateur par le perfectionnement des dispositifs techniques et plus particulièrement les moyens d'interaction en environnements virtuels immersifs (EVI). L'émergence des objets connectés grand public, qui touchent aujourd'hui tous les secteurs d'activité, ouvre une nouvelle perspective qui peut être intéressante en réalité virtuelle, à travers les objets qui peuvent être portés (e.g., montre équipée de capteurs, bracelet connecté pour le sport, ...). De ces appareils de mesure grand public nous pouvons extraire et exploiter plusieurs signaux, tels que des données physiologiques ou encore des

1. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/>

2. Paradigme de design pour les expériences de réalité virtuelle permettant aux utilisateurs de se mouvoir librement dans la zone de jeu, leurs mouvements réels se reflétant dans l'environnement virtuel.

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

4. <https://www.oculus.com/rift/accessories/>

5. <https://www.oculus.com/rift>

données inertielles. Il devient dès lors possible d’imaginer de nouvelles interactions directes (l’utilisateur est maître de ses actions et de ses décisions) ou indirectes (de par leur nature, les données physiologiques ne sont pas complètement contrôlées par l’utilisateur) en fonction du contexte. L’intégration d’un suivi des données physiques et physiologiques des participants permettrait, *in fine*, d’impliquer davantage les utilisateurs et de leur permettre de vivre de nouveaux types d’expériences. Pour parvenir à cet objectif, il faut donc penser les usages apportés par les objets connectés comme dispositifs d’interaction dans le cadre d’applications de réalité virtuelle, les implémenter et les évaluer.

Suivant une stratégie d’amélioration des expériences pour la formation en réalité virtuelle, l’entreprise *EON Reality SAS* a besoin de mieux comprendre quels sont les différents leviers de l’expérience utilisateur afin de pouvoir fournir des applications plus engageantes et apportant le maximum de valeur ajoutée pour l’utilisateur, un fort niveau d’engagement entraînant un meilleur apprentissage. Ainsi, dans le cadre de cette thèse, nous souhaitons étudier et mieux comprendre une nouvelle composante de l’expérience utilisateur en RV, à savoir l’effet des interactions basées sur des paramètres physiologiques dans les EVI. En effet, si l’immersion et les interactions en réalité virtuelle se font principalement au travers d’avatars respectant une dimension physique (tracking de mouvements, retour haptique), assez peu de travaux s’intéressent à la possibilité de créer une forme de double physiologique de l’utilisateur, c’est-à-dire former une synchronie physiologique entre l’utilisateur et son avatar.

1.2 Questions et périmètre de recherche

La problématique initiale de cette thèse s’inscrit dans le cadre d’un travail plus large :

Quels sont les intérêts et quelle est la faisabilité de l’intégration des objets connectés grand public comme moyen d’interaction en réalité virtuelle ?

Si cette question sert de cadre général à nos travaux, elle s’avère trop vaste et ne permet pas une étude en profondeur des conséquences d’une telle intégration sur l’expérience utilisateur. Notre étude de la littérature nous a permis de mettre en évidence deux axes d’investigation au sein même de cette problématique :

- L’utilisation des capacités de captation physiologique des objets connectés pour mettre en place des boucles de rétroactions physiologiques ;
- L’utilisation des informations inertielles des objets connectés pour mettre en place des métaphores d’interactions directes *via* des techniques de reconnaissance de gestes.

Le deuxième axe nous semble fortement porteur, car si les expériences virtuelles mobiles sont encore limitées par leur manque d’interaction, l’utilisation de solutions inertielles semblent être une réponse idéale. Cependant, si ce champ a été couvert par de nombreux travaux scientifiques, focalisés autour de centrales inertielles classiques, les apports des objets connectés nous semblent de faibles importances.

De plus, il est intéressant de noter que si de nombreuses études ont démontré l’intérêt de la rétroaction physiologique dans différents domaines, son potentiel en réalité virtuelle n’a pas été pleinement exploré [Siriborvornratanakul, 2016]. Les données physiologiques sont porteuses d’une grande quantité d’informations sur nous-même, notre santé, nos réactions ou encore nos émotions. Si exploiter ces données peut amener à mieux évaluer et modéliser l’expérience utilisateur, elles peuvent également permettre de la contrôler et de l’améliorer. Si les outils de captation physiologique sont nombreux, dans le cadre des objets connectés grand public, on retrouve principalement des capteurs d’activité cardiaque ou de micro-sudation. Ces deux données offrent des informations différentes mais complémentaires dans la compréhension des réactions émotionnelles. La captation de la micro-sudation reste cependant problématique, elle est d’une part complexe à analyser mais elle présente surtout le fort inconvénient d’être sensible au mouvement, ce qui limite son utilisation dans le cadre d’expériences virtuelles immersives. A l’opposé, l’activité cardiaque est plus simple à interpréter et profite d’une littérature scientifique plus étoffée. Les capteurs qui la mesurent sont considérés comme plus développés et sont plus robustes aux artefacts de mouvements.

Pour ces raisons, nous avons recentré nos recherches sur l'utilisation de la physiologie et plus précisément du rythme cardiaque, afin d'en étudier les différentes modalités d'utilisation potentielles dans des expériences virtuelles immersives. De nombreux travaux ont montré l'intérêt de la mise en place d'une rétroaction physiologique dans le cadre d'expériences interactives. Par ailleurs, la capacité des personnes à influencer de manière volontaire leur rythme cardiaque a été démontrée dans d'autres travaux, tels ceux de Sroufe. Ainsi, cette focalisation sur l'activité cardiaque nous permet à la fois une étude sur son rôle passif dans une expérience virtuelle mais également sur son utilisation active et volontaire par l'utilisateur, touchant ainsi une majorité des facteurs de l'expérience utilisateur en réalité virtuelle. Cela nous amène à la redéfinition et au recentrage de notre problématique de recherche :

Quels sont les apports de l'intégration du rythme cardiaque, fourni par des objets connectés grand public, pour l'expérience utilisateur dans les environnements virtuels immersifs ?

Nous pouvons dès lors concentrer notre étude sur les différents verrous qu'elle présente. L'expérience utilisateur est une donnée fortement subjective, tant elle est dépendante des caractéristiques intra-individuelles. Notre étude se tourne ainsi vers une approche empirique, ayant pour objectif de comprendre les différences que vont apporter les augmentations portées par l'intégration du rythme cardiaque. Ainsi, nous décomposons notre problématique sous forme de questions opérationnelles qui guideront nos travaux, en soulevant des questionnements auxquels devra répondre notre état de l'art et qui seront explorés au travers de nos expérimentations.

Q1 : Quels sont les avantages et les inconvénients de l'utilisation des objets connectés ?

- *Q1.1 : Quel niveau de robustesse possèdent ces outils ?*
- *Q1.2 : Quel est le niveau de précision des données captées et quelles sont les limites d'utilisation ?*
- *Q1.3 : Ces outils sont-ils à même de s'intégrer dans un système de réalité virtuelle déjà complet ?*

Les réponses à la question Q1 et aux questions sous-jacentes seront principalement apportées par notre revue de littérature, notre étude étant davantage focalisée sur l'étude de l'expérience utilisateur que sur une revue technologique des outils que nous utilisons. Ainsi nos expérimentations nous permettront de proposer des réponses à partir de données subjectives, notamment en ce qui concerne la question Q1.3, et ainsi de poser la première pierre de la construction d'études plus spécifiques.

Q2 : Quels sont les apports et modalités d'une boucle de rétroaction physiologique cardiaque sur l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif ?

En raison de la complexité et de la subjectivité de l'expérience utilisateur en réalité virtuelle, de nombreux modèles ont été proposés et il n'existe pas encore aujourd'hui de modèle unifié, comme le montre notre état de l'art (voir la section 2.1). Nous nous appuyons ainsi sur plusieurs modèles issus de différents domaines notamment de ceux de l'interaction homme-machine et des jeux-vidéo. Ces médias interactifs possèdent en effet de fortes similarités avec la réalité virtuelle et ont déjà été le contexte d'études concernant la rétroaction physiologique. Ainsi, ils nous servent de base pour mieux comprendre les différents effets de la rétroaction physiologique sur l'expérience utilisateur et les anticiper dans le cadre de la construction de nos expérimentations. À partir de ces études, nous discutons du cadre d'analyse et des échelles de mesure les plus pertinents à retenir pour nos travaux.

Q3 : L'activité cardiaque peut-elle être une mécanique d'interaction en EVI ?

Si l'utilisation de l'activité cardiaque a été longuement étudiée dans le cadre de la rétroaction physiologique, elle est souvent considérée comme une mécanique d'interaction passive. Notre objectif est de l'étudier non pas uniquement pour une utilisation passive dans une expérience virtuelle immersive mais aussi d'explorer son potentiel dans le cadre d'une interaction active. La littérature met en évidence la capacité des individus à influencer sur leur propre rythme cardiaque, laissant entrevoir la possibilité de faire de l'activité cardiaque une mécanique volontairement contrôlée dans le cadre d'une expérience interactive. La réalité virtuelle offrant un cadre particulièrement engageant et immersif, l'utilisation de ce type de mécanique pourrait avoir des effets prégnants sur l'expérience utilisateur. L'objectif de nos expériences est donc de comprendre quels sont les effets induits par l'utilisation de la rétroaction physiologique sur l'UX et d'identifier les différents facteurs affectés. Nous distinguons les situations d'interactions directes (une action directe et volontaire) et indirectes (modifiant le comportement de l'expérience).

1.3 Plan du mémoire

L'objectif de ce travail de thèse est de mieux comprendre les impacts de la rétroaction physiologique cardiaque, *via* des capteurs connectés grand public, sur l'expérience utilisateur dans les EVI. Dans le **chapitre 2**, présentant notre revue de littérature, nous introduisons ainsi le concept d'expérience utilisateur en environnement virtuel et notamment trois de ses composantes que nous avons étudiées dans nos expérimentations : la présence, l'engagement et le sentiment d'agentivité. Nous investiguons ensuite le liens entre le sentiment de présence et les émotions pour comprendre les liens et intrications entre les différents facteurs présentés. Cette revue de littérature touche différents domaines de l'interaction homme machine tels que le jeu vidéo, l'informatique et principalement la réalité virtuelle, dans le but de mieux comprendre ce qui définit et caractérise l'expérience utilisateur. Nous introduisons ensuite les données physiologiques et leur utilisation pour des boucles de rétroaction, en commençant par évoquer le lien entre la physiologie et les émotions, ceci rendra saillant son intérêt dans le cadre de l'expérience utilisateur en réalité virtuelle. Nous présentons alors comment sont utilisées les boucles de rétroaction physiologique et quels sont leurs apports en matière d'expérience utilisateur. A partir des travaux de Bandura [1982], nous expliquons le concept d'auto-efficacité comme la croyance que possède un individu dans sa capacité à réaliser une tâche et notamment à contrôler ses réactions physiologiques. Cela nous permettra une nouvelle fois de tisser le lien entre les données physiologiques et leur utilisation dans l'augmentation de l'expérience utilisateur. Si ces concepts semblent principalement applicables à la médecine, de nombreux autres usages ont été développés, pour la relaxation (<https://guidedmeditationvr.com/> ou <https://wilddivine.com/products/biofeedback-games-bundle-0>) ou encore le divertissement (<http://nevermindgame.com/>). Nous présenterons plus en détail des études sur l'utilisation de la rétroaction physiologique comme une interface d'interaction. Enfin, nous discutons l'utilisabilité des objets connectés comme plate-forme de suivi de données physiologiques, en présentant des travaux étudiant leur robustesse et la qualité des données transmises, puis les premières études rapportant leur intégration dans des systèmes complexes tels que ceux utilisés en réalité virtuelle. Cette analyse de la littérature se conclue par l'explication de nos hypothèses de recherche et du déroulé de nos travaux.

Le **chapitre 3** est consacré à la présentation de la méthodologie mise en place, basée sur des études empiriques. Dans les **chapitres 4, 5 et 6** nous présentons les différentes expérimentations menées, en suivant le plan suivant : introduction des objectifs, description du système matériel et logiciel mis en œuvre, le protocole établi, la présentation et analyse des résultats et enfin une discussion synthétique des apports.

Le **chapitre 7** présente les contributions issues des différentes phases d'expérimentations et les discute pour apporter une réponse à nos questions de recherche. En analysant rétrospectivement et avec un regard critique le déroulé des travaux, nous pourrions conclure en mettant en évidence les limites de ce travail ainsi que les perspectives qu'il ouvre pour de futures études.

Chapitre 2

État de l'art

Sommaire

2.1	Expérience utilisateur	12
2.1.1	Présence et émotions	13
2.1.2	De la présence à l'engagement	17
2.1.3	Agentivité	21
2.2	Données physiologiques pour des boucles de rétroaction biologique	25
2.2.1	Physiologie et émotions	25
2.2.2	Rétroaction physiologique ou <i>biofeedback</i>	30
2.2.3	Auto-efficacité	32
2.2.4	Le <i>biofeedback</i> comme interface d'interaction	35
2.3	Les objets connectés comme plateforme mobile de suivi de données physiologiques	45
2.4	Résumé de l'état de l'art	51
2.5	Hypothèses et déroulement des travaux	54

2.1 Expérience utilisateur

L'expérience utilisateur (*User Experience* ou UX) est définie par l'Organisation Internationale de la Standardisation (*ISO : International Organization for Standardization*) par la norme ISO 9241-210 (2009) comme « *Les perceptions et les réponses (physiques et psychologiques) d'une personne qui résultent de l'usage ou de l'anticipation de l'usage d'un produit, d'un système ou d'un service* ». Cette norme précise aussi que l'UX inclut non seulement les perceptions et les réponses de l'utilisateur, mais aussi « *ses émotions, ses croyances, ses préférences, ses comportements et ses réussites qui se présentent avant, pendant ou après l'usage* ». De plus l'UX intègre « *une conséquence de l'image de la marque, la présentation, la fonctionnalité, la performance du système, du comportement interactif et de la capacité d'assistance du système interactif* ». Cette définition très large a été reprise dans de nombreuses disciplines et déclinée en fonction des contraintes et des attentes de celles-ci.

Si dans le cadre des interactions homme-machine la définition de l'UX semble actée, les différentes modalités apportées par la Réalité Virtuelle (RV) en matière d'immersion et d'interaction la rendent plus complexe à définir. Ainsi, de nombreux modèles de l'UX en RV ont été établis, la décomposant en plusieurs dimensions : l'immersion [Biocca, 2003; Slater, 2003], la présence [Bouvier, 2009; Lombard et Ditton, 1997], l'engagement [O'Brien et Toms, 2008], l'émotion [Geslin, 2013], la maîtrise, et bien plus (voir par exemple les travaux de Tcha-Tokey *et al.* [2016] dont le modèle est présenté dans la figure 2.1).

S'appuyant sur ces modèles, des travaux ont permis d'établir de nombreuses similarités entre la réalité virtuelle et les expériences vidéo-ludiques plus traditionnelles. Récemment, Lum *et al.* [2018] ont cherché à évaluer les différences entre ces deux médias, selon les critères d'émotion, d'immersion et de présence. Pour cela, ils opposent le *HTC Vive* et la *Xbox* avec le système de tracking *Kinect*, sur le jeu *Fruit Ninja*¹. Les résultats de leur étude indiquent que les participants ressentent un niveau d'immersion plus fort lorsqu'ils utilisent la réalité virtuelle. De fait, le fort degré d'immersion induit par les expériences en environnement virtuel immersif a vocation à radicalement impacter l'expérience utilisateur et les conséquences de celle-ci en termes de sentiment de présence, d'émotions ressenties, d'engagement et d'agentivité. Ces différents aspects, leur définition et leurs effets sur les utilisateurs, sont abordés dans la suite de ce chapitre.

1. Halfbrick Studios - 2010

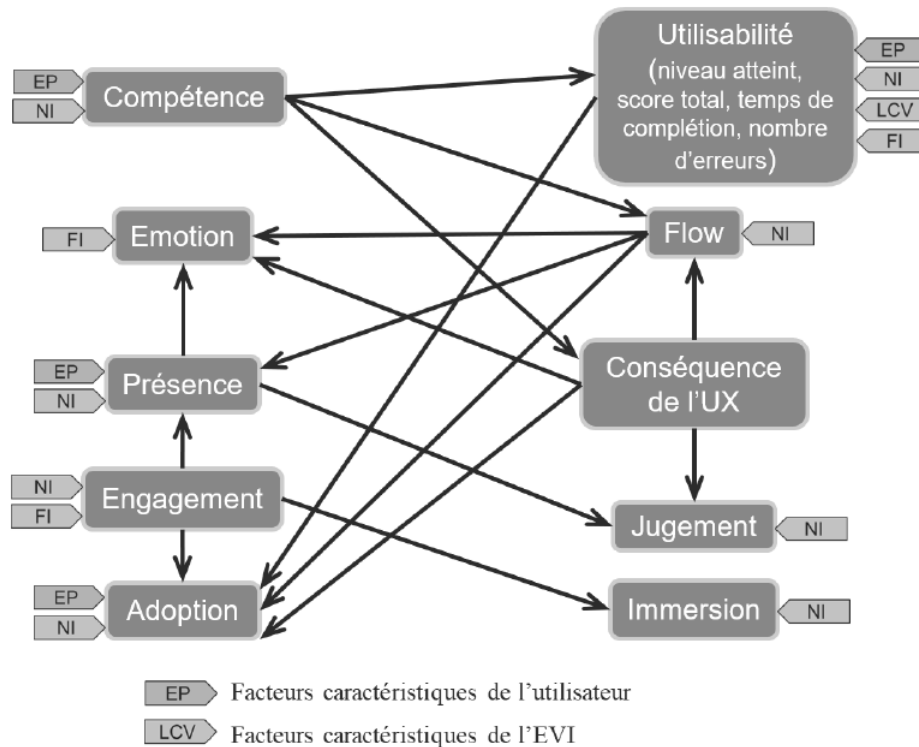


FIGURE 2.1 – Modèle de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif par Tcha-Tokey *et al.* [2016] (NI : Niveau d'Interaction ; FI : Fréquence d'Image ; LCV : Largeur du Champ de Vision ; EP : Expérience Précédente)

2.1.1 Présence et émotions

La présence est une notion complexe qui a été étudiée par de nombreux chercheurs [Bouvier, 2009; Lombard et Ditton, 1997; Slater *et al.*, 1994]. Elle est généralement définie comme l'expérience psychologique « d'être là » (« being there ») dans un environnement virtuel [Slater *et al.*, 1994]. Dans un essai, McMahan [2003] tente de présenter une vision extensive de la présence, de l'immersion et de l'engagement dans les expériences vidéo-ludiques. Si, dans cet écrit, les définitions de la présence et de l'immersion sont souvent tronquées et substituées l'une à l'autre, McMahan présente l'immersion « *comme la sensation d'être complètement entouré par une réalité complètement autre, qui prend le pas sur l'intégralité de notre attention et de notre appareil sensoriel* ». L'auteure différencie ainsi l'immersion du sentiment de présence en s'appuyant sur la définition Lombard et Ditton [1997], c'est-à-dire l'illusion de non-médiation dans un environnement virtuel. Cette définition rattache l'immersion à des composantes techniques et technologiques. Elle pose le degré d'immersion comme dépendant de la qualité des interactions et de l'interfaçage. À cette approche technologique, défendue également par Slater [2003], on peut opposer l'approche psychologique défendue par Biocca [2003], qui explique, *via* le « problème du livre » (ressentir un fort sentiment de présence

en lisant un livre) que la présence ne pourrait être réduite à l'immersion sensorimotrice, il faut prendre en compte l'imagination qui joue un rôle fort [Burdea et Coiffet, 2003]. Ces deux approches peuvent être associées de manière à obtenir une position équilibrée [Bouvier, 2009]. En effet, le sentiment de présence ne se limite pas à une immersion technologique de qualité mais aussi à une immersion (dite) psychologique. Celle-ci amène le sujet à consacrer ses ressources cognitives et émotionnelles aux activités réalisées en EVI. La combinaison de ces composantes, technologique et psychologique, permet d'atteindre un niveau de présence satisfaisant, cette dernière étant vue comme la garantie d'une expérience réussie de réalité virtuelle.

Si le sentiment de présence « transporte » une personne dans un environnement différent, il ne consiste pas uniquement en une illusion de déplacement du corps vers le virtuel. En effet, il y a une intrication forte entre le sentiment de présence et d'autres dimensions de l'UX, comme le montrent les travaux de Tcha-Tokey *et al.* [2016]. Il existe une interaction circulaire entre la présence et les émotions : le sentiment de présence est plus fortement ressenti lors d'expériences émotionnelles ; de manière réciproque, l'activation émotionnelle peut être influencée par le niveau de présence [Baños *et al.*, 2004; Riva *et al.*, 2007]. Diemer *et al.* [2015] ont également montré que plus les émotions impliquées dans l'expérience étaient fortes, plus il était possible d'observer une corrélation significative entre la présence et les émotions. Ainsi Bouvier [2009] ainsi que Geslin [2013] défendent l'idée d'un lien entre la présence en réalité virtuelle et les émotions et expliquent que le sentiment de présence ne peut durer que si une expérience est porteuse d'émotions. Ils atteignent les mêmes conclusions que Price et Anderson [2007], qui démontrent qu'un simple environnement induisant des émotions (e.g. la joie ou la tristesse) affecte positivement le sentiment de présence.

Dans une volonté de mieux comprendre et définir l'émotion ressentie dans des expériences virtuelles immersives, Murphy [2016] en présente une taxonomie :

- Émotions de fiction, liées à l'expérience active (d'incarnation) du jeu ;
- Émotions de *gameplay*, liées à la perception du *gameplay* et non aux agents narratifs ;
- Émotion d'artefacts, les (méta-)émotions ou états affectifs provoqués par la reconnaissance de l'état d'un artefact de jeu comme provoqué par une personne ;
- Émotion d'immersion, générée par des événements en RV qui sont involontairement considérés comme réels.

Suivant cette volonté de mieux comprendre le lien entre réponse émotionnelle et environnement virtuel, Moghimi *et al.* [2016] s'intéressent à la manière dont une personne évalue

sa réponse émotionnelle en environnement virtuel et quels impacts a celle-ci sur l'expérience émotionnelle. Ils s'appuient sur un modèle à trois dimensions (la figure 2.2 représente un modèle circomplexe² simplifié incluant deux de ces composantes : la valence et la stimulation) :

1. Valence : dans quelle mesure l'expérience de jeu était-elle plaisante ?
2. Stimulation : dans quelle mesure l'expérience était-elle stimulante (allant d'excitante, maintient en alerte, stressante jusqu'à relaxante, ennuyante, fatigante) ?
3. Domination : A quel point l'utilisateur contrôle l'expérience ?

Moghimi *et al.* [2016] observent que différents incidents de jeu (e.g. éviter un adversaire, navigation libre) peuvent avoir des conséquences sur l'expérience utilisateur et peuvent notamment avoir des effets cumulés sur l'induction d'émotions. Ils démontrent de plus que le profil du joueur (e.g. sexe, habitude de jeu) est un facteur d'influence très important sur l'expérience émotionnelle vécue, montrant qu'il n'est pas de modèle unique de l'expérience émotionnelle.

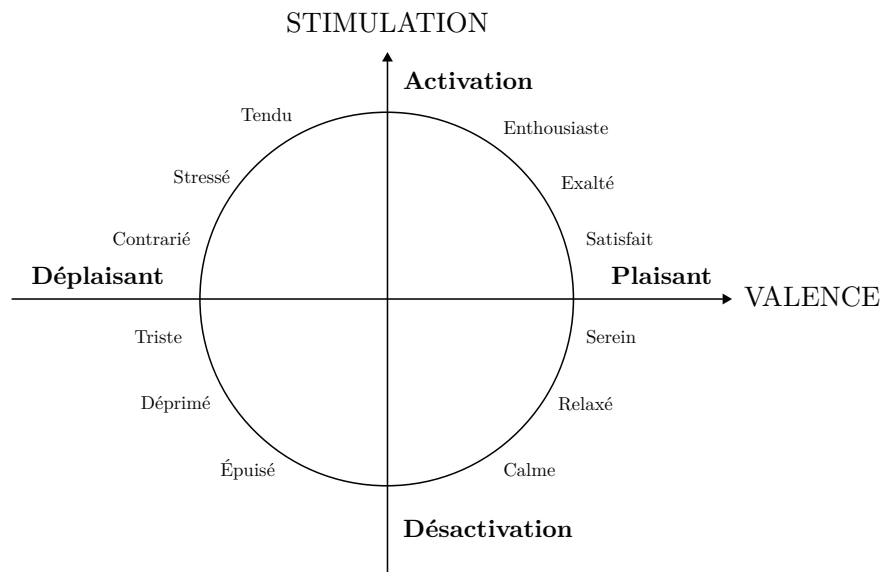


FIGURE 2.2 – Modèle circomplexe de la valence-stimulation

Geslin [2013] se concentre sur la possibilité d'induire des émotions en environnement virtuel et dans les jeux vidéos, afin d'influer positivement sur le sentiment de présence. Il se concentre sur deux émotions simples à induire que sont la peur et la surprise, car ces émotions ne demandent pas une implication longue de l'utilisateur dans l'EVI. Les premières conclusions de ses travaux montrent une désensibilisation aux émotions de peur et de surprise des habitués de jeux vidéos, ce qui indique l'importance du profil de l'utilisateur dans

2. Représentation graphique des interactions d'une entité centrale, utilisant des coordonnées polaires.

l'expérience émotionnelle [Moghimi *et al.*, 2016]. Cependant plus l'expérience est longue, plus les joueurs de jeux vidéos sont investis émotionnellement tandis que les non joueurs perdent l'intérêt pour la tâche.

Les émotions ont donc une importance cruciale dans la caractérisation de l'expérience utilisateur, et doivent être prises en compte pour la création de meilleures expériences. En effet, d'après Van Gorp et Adams [2012], le design basé sur les émotions peut affecter profondément l'expérience générale de l'utilisateur. Les émotions influencent la prise de décision, l'attention affective, la mémoire et *in fine* donnent du sens à l'expérience. Pour démontrer l'importance de l'expérience émotionnelle dans la construction d'une bonne expérience virtuelle, Zhang *et al.* [2017] comparent immersion spatiale et émotionnelle. Ils définissent la première comme un type d'immersion déclenchée et maintenue par les qualités spatiales de l'environnement. L'immersion spatiale est atteinte lorsque le participant ressent la possibilité de se déplacer, de toucher et de ressentir l'environnement et la mise en scène spatialisée. L'immersion émotionnelle, elle, se déclenche lorsque l'utilisateur ressent une stimulation émotionnelle et est absorbé par le contenu narratif de l'histoire; elle ne permet pas forcément à l'utilisateur d'atteindre une « présence physique » [Lee, 2004] dans la scène mais de s'y identifier de manière cognitive ou empathique. S'ils listent un grand nombre de types d'immersion différentes, Zhang *et al.* les catégorisent en deux classes principales : l'immersion empathique³ et l'immersion incarnée⁴. Ainsi, ils notent que le contenu émotionnel est plus immersif que le contenu spatial, constituant un plus fort vecteur de stimulation. L'immersion spatiale est plus immersive en matière de réalisme externe (quand l'environnement est en accord avec le monde réel) et de réalisme narratif (quand l'environnement est cohérent avec l'histoire racontée) mais lorsque les deux types d'immersions sont pris ensemble, la dimension émotionnelle permet d'augmenter nettement le sentiment de réalisme. Lorsqu'un utilisateur est émotionnellement immergé, il lui est plus simple de bloquer les distractions externes.

Ainsi, si l'expérience émotionnelle impacte l'immersion, elle a potentiellement un effet sur le sentiment d'incarnation. C'est à partir de cette hypothèse que Jun *et al.* [2018] étudient l'effet des changements émotionnels sur le sentiment de possession du corps virtuel et cherchent à savoir si les changements d'expressions d'un avatar virtuel peuvent modifier les effets de l'illusion d'appropriation. La possession corporelle fait référence à la perception que l'on a de son propre corps, rendant les sensations corporelles uniques à soi, et créant un sentiment de possession de ce corps [Maister *et al.*, 2015]. Jun *et al.* concluent que cette illusion

3. Elle est atteinte lorsque l'utilisateur forme une représentation du monde réel et la projette dans le monde virtuel, usant d'imagination ou d'autres capacités psychologiques, cognitive ou émotionnelle

4. Elle est atteinte lorsque l'utilisateur ressent la présence de son corps dans l'environnement virtuel, comme s'il y entraînait physiquement et interagissait avec ses éléments

d'appropriation est plus forte lorsqu'il y a une synchronie motrice. De plus, ils notent que lorsque les mouvements sont synchronisés et que l'avatar arbore une expression joyeuse, cela déclenche chez l'utilisateur un changement émotionnel positif, le changement émotionnel est négatif s'il arbore une expression neutre ou de mécontentement. Ceci nous permet d'avoir un premier aperçu de l'intrication entre émotion et incarnation.

Les EVI étant pleinement personnalisables, il est possible de contrôler leur contenu pour qu'ils soient inducteurs d'émotions et donc plus enclins à générer un fort sentiment de présence et, *in fine*, une meilleure expérience utilisateur. Certains travaux portent donc sur les leviers d'induction d'émotion. Grâce à un outil de réalité virtuelle mélangeant différents type de stimuli (images, musiques et extraits vidéos), Orefice *et al.* [2017] parviennent à susciter des émotions chez les participants à leur expérimentation, la joie principalement. Dans un contexte proche, Reimer et Khosmood [2016] étudient la faisabilité d'une méthode d'induction émotionnelle dans le cadre d'expériences vidéo-ludiques, *via* des stimuli audiovisuels dynamiques. Ils s'intéressent ainsi à deux états émotionnels, une émotion à valence négative (*fear*, qu'ils associent à un environnement plus sombre, contrasté, avec présence de brouillard, de flou, de bruits d'animaux nocturnes et d'une musique de fond « étrange ») et une émotion à valence positive (*peace*, qu'ils associent à un environnement plus clair, lumineux, avec des bruits d'animaux diurnes). Cette étude leur permet de valider la technique d'induction grâce aux changements visuels et sonores adaptés à chaque émotion. Ils notent de manière intéressante qu'il n'y a pas de différence significative sur l'émotion induite par les différents environnements proposés, ce qui pourrait indiquer que le contenu du jeu n'interfère pas avec le processus d'induction.

Les contributions des études rapportées ci-avant sont doubles. D'une part, elles amènent une meilleure compréhension de l'impact de l'expérience émotionnelle sur l'UX. D'autre part, elles mettent en évidence la capacité des EVI à induire des émotions en temps réel, mais aussi à contrôler à quel point celles-ci vont permettre à l'utilisateur de se sentir plus présent, plus investi dans l'expérience qu'il est entrain de vivre. Il est dès lors possible d'envisager une nouvelle vision des expériences virtuelles, qui soient plus fortement vectrices d'émotions et par conséquent, générant un meilleur sentiment de présence et d'immersion.

2.1.2 De la présence à l'engagement

Aujourd'hui encore, il n'existe pas de consensus sur la définition de l'engagement. Ce concept est souvent confondu avec la notion d'implication. La difficulté de proposer une définition unique tient également fortement du contexte étudié. Nous pouvons dans un premier

temps catégoriser l'engagement selon trois dimensions, celui-ci pouvant être facial, empathique et utilisateur [Glas et Pelachaud, 2015]. L'engagement facial est défini notamment par rapport à des actions sociales, il peut être résumé par le processus par lequel deux personnes ou plus établissent, maintiennent et accomplissent une connexion [Bohus et Horvitz, 2009; Goffman, 1966; Poggi, 2007; Sidner et Dzikovska, 2002]. L'engagement empathique, défini par Hall *et al.* [2005], concerne l'implication émotionnelle d'un utilisateur envers un personnage de synthèse afin de créer une expérience cognitive et émotionnelle cohérente. Enfin, l'engagement de l'utilisateur représente le niveau d'implication, d'attention portée à une tâche d'interaction [Bickmore *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2004], mais aussi la qualité de l'expérience caractérisée « *par les attributs de challenge, d'affect positif, d'endurabilité, d'esthétique et d'attirance sensorielle, de concentration, de feedback, de nouveauté, d'interactivité et de niveau de contrôle perçu par l'utilisateur* » [O'Brien et Toms, 2008, p. 1]. C'est dans le cadre de l'interaction Humain-Agent que Glas et Pelachaud [2015] tentent d'agrèger ces trois dimensions de l'engagement pour fournir une définition exhaustive. Ils dégagent sept concepts qui sont liés à la notion d'engagement : l'attention, l'implication, l'intérêt, l'immersion, la relation (le sentiment d'être en synchronie avec autrui), l'empathie et la posture (l'attitude, la position émotionnelle).

La notion d'engagement, dans ses multiples définitions, repose le plus souvent sur un concept majeur : le *flow*. Le *flow* est défini par Csikszentmihalyi [1975] comme étant « *l'état mental d'opération d'une personne lorsqu'elle est complètement plongée dans une activité et qu'elle se trouve dans un état maximal de concentration, de plein engagement et de satisfaction dans son accomplissement* ». Il représente l'équilibre entre le niveau de difficulté proposé par l'activité et le niveau de compétence de l'utilisateur. Csikszentmihalyi définit six aspects entourant l'expérience du *flow* :

- Concentration intense focalisée sur le moment présent ;
- Disparition de la distance entre le sujet et l'objet ;
- Perte du sentiment de conscience de soi ;
- Sensation de contrôle et de puissance sur l'activité ou la situation ;
- Distorsion de la perception du temps ;
- L'activité est en soi source de satisfaction.

Le concept de *flow* peut s'appliquer à de nombreuses activités, la lecture, le sport, l'apprentissage, les jeux vidéo, etc... Ainsi de nombreuses études ayant pour objectif de quantifier le niveau d'engagement lors d'une tâche s'inspirent des travaux de Csikszentmihalyi sur la mesure du *flow*.

Les mécaniques sous-jacentes du *flow* se retrouvent fortement dans les retours d'expériences des joueurs de jeux vidéo. Brockmyer *et al.* [2009] développent une échelle de mesure subjective permettant de mesurer le niveau d'engagement de l'utilisateur lorsque celui-ci joue à un jeu vidéo : le *Game Engagement Questionnaire (GEQ)*. Dans leur étude, ils utilisent le terme « engagement » comme indicateur générique du niveau d'implication en jeu. Selon leur modèle, le niveau d'implication utilisateur est dépendant de la présence, du *flow*, de l'absorption et de la dissociation. En s'appuyant sur les travaux de Mania et Chalmers [2001], Mikropoulos et Strouboulis [2004], Ryan *et al.* [2006] et Tamborini et Skalski [2006], Brockmyer *et al.* [2009] définissent la présence comme le fait d'être dans un état normal de conscience et d'avoir la sensation d'être à l'intérieur d'un environnement virtuel. L'absorption psychologique est présentée comme un état total d'implication dans l'expérience en cours [Irwin, 1999]. Cependant et contrairement au *flow*, l'absorption peut s'accompagner d'émotions négatives. Enfin, la dissociation psychologique représente un état durant lequel une personne « *n'intégrera pas normalement ses pensées, ses émotions et ses expériences dans le flot de sa conscience et de sa mémoire* » [M. Bernstein et W. Putnam, 1986, p. 727]. Il s'agit d'un mécanisme de défense face à des expériences déplaisantes.

Les travaux d'Hassenzahl *et al.* [2010] apportent une vision en accord avec ces différents travaux, mais simplifiée : ils divisent l'engagement en deux catégories principales, pragmatique (utilité et utilisabilité du système) et hédonique (motivation, stimulation et challenge pour l'utilisateur). De ces travaux ont découlé plusieurs échelles pour mesurer l'engagement dans les jeux et les systèmes d'interaction homme-machine. Les travaux de Wiebe *et al.* [2014] tentent notamment de mettre en place un cadre théorique permettant de définir et mesurer l'engagement de l'utilisateur dans des environnements vidéo-ludiques. Ils affinent ainsi le modèle présenté par O'Brien et Toms [2010] et déduisent que l'engagement de l'utilisateur est fonction de la concentration, de l'utilisabilité perçue, de l'esthétique et d'un quatrième facteur qu'ils nomment la satisfaction (composé de l'endurabilité, de la nouveauté perçue et de l'implication ressentie). Le terme de satisfaction renvoie à la construction de ce facteur sur des notions liées à l'hédonisme de l'expérience vécue. Ainsi le modèle de Wiebe *et al.* [2014] coïncide non seulement avec le celui de O'Brien et Toms [2010] mais aussi avec une interprétation large du concept de *flow*, incluant les qualités hédoniques dont la satisfaction, comme présenté par Hassenzahl *et al.* [2010].

Plus récemment, Phan *et al.* [2016] ont tenté de mieux comprendre ce que représente la satisfaction utilisateur dans une expérience vidéo-ludique. Pour ce faire, ils ont développé une nouvelle échelle de mesure : *Game User Experience Satisfaction Scale (GUESS)*. Ils présentent

la satisfaction utilisateur comme une construction multi-modale qui implique plusieurs dimensions, telles que l'immersion, l'amusement, l'esthétique et la motivation [Federoff, 2002]. Ils indiquent aussi que l'engagement, l'immersion, la présence et le *flow* sont des éléments clés dans le ressenti de la satisfaction utilisateur dans une expérience vidéo-ludique. De leur étude de la littérature, ils arrivent à une échelle composée de neuf facteurs :

1. L'utilisabilité ou jouabilité : la facilité avec laquelle le jeu peut être joué, avec des objectifs clairs et un minimum d'interférences cognitives ou d'obstructions des interfaces utilisateur et de contrôles ;
2. La narration : les aspects narratifs du jeu (par exemple, les personnages et les événements) et leur capacité à captiver le joueur et façonner ses émotions ;
3. La passion ludique : le degré auquel le jeu est capable de maintenir l'attention et l'intérêt du joueur ;
4. Le plaisir : la quantité de plaisir et de joie perçue par le joueur résultant de son expérience de jeu ;
5. La liberté créative : le degré auquel le jeu est capable de favoriser la créativité et la curiosité du joueur et lui permet d'exprimer librement son individualité en jouant ;
6. L'esthétique audio : les différents aspects audio du jeu (effets sonores, musiques) et à quel point ils enrichissent l'expérience de jeu ;
7. La satisfaction personnelle : les aspects motivationnels du jeu (le niveau de challenge) qui promeuvent le sentiment d'accomplissement du joueur, son désir de réussir et de continuer à jouer ;
8. La connectivité sociale : le degré avec lequel le jeu facilite la connexion sociale entre des joueurs à travers ses outils et fonctionnalités ;
9. L'esthétique visuelle : les graphismes du jeu et le degré d'attractivité pour le joueur.

Cette échelle est centrée sur la satisfaction utilisateur mais l'on y retrouve de nombreux concepts déjà évoqués précédemment tels que l'implication, l'utilisabilité ou encore la gratification, qui sont par extension liés aux notions d'engagement, de *flow* et d'immersion. Si chacun de ces concepts peut être mesuré indépendamment, ils sont aussi fortement interdépendants. Aux vues de ces différentes études, nous pouvons supposer qu'il existe une relation circoplexe entre la satisfaction utilisateur et l'engagement, un fort niveau d'engagement étant synonyme d'une expérience de qualité.

Lessiter *et al.* [2001] définissent le sentiment de présence comme multi-modal, composé de multiples facteurs : l'espace physique, l'engagement, la naturalité et un quatrième facteur atténuant le sentiment de présence : les effets négatifs. Ainsi, comme mis en lumière dans

les travaux de Brockmyer *et al.* [2009], il existe une forte relation entre les sentiments de présence et d'engagement dans les applications interactives. Un fort sentiment d'engagement permettant l'émergence d'un plus fort sentiment de présence et inversement (voir figure 2.3).

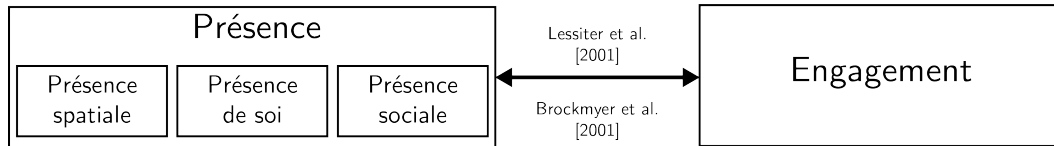


FIGURE 2.3 – Illustration des intrications entre les sentiments de présence et d'engagement

2.1.3 Agentivité

L'agentivité fait référence au sentiment d'intention et d'exécution d'actions, incluant la sensation de contrôle des mouvements de son propre corps [Tsakiris *et al.*, 2006, 2007]. Le sentiment d'appropriation corporelle est présent durant la réalisation d'actions volontaires, ce qui produit un sentiment d'agentivité [Tsakiris *et al.*, 2006]. Blanke et Metzinger le définissent comme la sensation de « *contrôle moteur global, incluant l'expérience subjective de l'action, du contrôle, de l'intention, de la sélection motrice et de l'expérience consciente de la volonté* » [Blanke et Metzinger, 2009, p. 1].

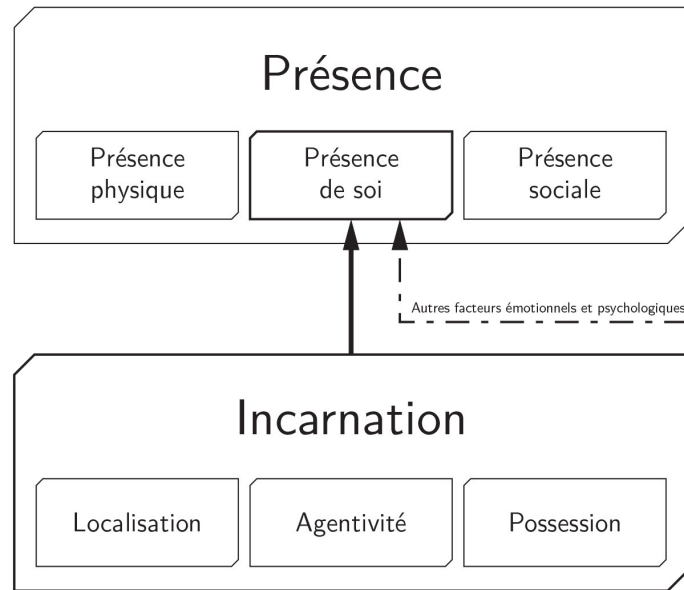
Si la définition de l'agentivité semble principalement tournée autour de l'exercice conscient de fonctions motrices, elle dépasse en réalité ce cadre. En effet, le sentiment d'agentivité peut être ressenti grâce à d'autres mécaniques : par exemple, Kway et Mitchell [2018] étudient comment l'agentivité peut émerger lorsque les utilisateurs prennent des décisions qui ont une importance émotionnelle et ce, quelle que soit l'importance de l'impact. Tanenbaum et Tanenbaum [2009] expliquent que le plaisir issu du sentiment d'agentivité vient de la liberté d'agir dans l'environnement sans restriction, et redéfinissent l'agentivité comme « *le processus par lequel des participants à une interaction s'engagent sur son sens* ». Une définition plus largement acceptée de Murray [1997] décrit l'agentivité comme « *le pouvoir satisfaisant de réaliser des actions porteuses de sens et d'observer les résultats de nos décisions et de nos choix* ». Dans leurs travaux, Mateas [2001]; Mateas et Stern [2010] présentent par ailleurs deux types d'agentivité : une locale, impactant des éléments narratifs locaux immédiats, et une globale, impactant des éléments narratifs sur le long terme (arcs narratifs). Weir [2011] étend le concept aux émotions, en proposant le concept « d'agentivité émotionnelle ». Il le décrit comme un moyen d'expliquer comment l'agentivité peut être perçue par des joueurs lorsque les choix qu'ils doivent effectuer n'ont pas d'impact sur l'histoire du jeu mais ont tout de même un impact émotionnel sur eux.

Au delà des actions émotionnelles ou motrices évoquées précédemment, l'agentivité peut également résulter d'un contrôle de soi plus profond. Bandura [1982] explique que les capacités d'autorégulation physiologique (cardiaque, respiratoire, musculaire) nécessitent des outils dérivant de l'agentivité propre, car « *les personnes qui sont sceptiques quant à leur capacité à exercer un contrôle adéquat sur leurs actions ont tendance à saper leurs efforts dans des situations qui mettent à l'épreuve leurs capacités* ». Cette conclusion est soutenue par de récents travaux sur le lien entre le contrôle physiologique et l'agentivité [Prpa *et al.*, 2018; Weerdmeester *et al.*, 2017], démontrant la complexité de cette notion et comment elle émerge d'un chevauchement complexe d'intentions, de conséquences et aussi d'implications.

Dans le domaine de l'interaction homme machine et plus précisément de la réalité virtuelle, le sentiment d'agentivité est redéfini par Sato et Yasuda [2005] comme le sentiment d'auto-agentivité, dans le sens où l'on est celui générant l'action. Ils se concentrent sur le degré de divergence résultant de la comparaison entre les feedbacks sensoriels prédis et réel. Limerick *et al.* [2014] proposent que le sentiment d'agentivité se réfère à l'expérience de contrôler son propre corps et l'environnement. Ainsi, du sentiment d'agentivité va naître une illusion d'incarnation [Kilteni *et al.*, 2012]. L'incarnation ayant été décomposée par Kilteni *et al.* en trois facteurs : la localisation, l'agentivité et la possession. Une étude menée par Banakou et Slater [2014] a démontré que l'illusion d'appropriation corporelle créée par un environnement virtuel peut générer l'illusion d'un sentiment d'agentivité, tel que les participants pensent effectuer des actions qui ne sont dans les faits pas dépendantes d'eux même.

Comme suggéré par Kilteni *et al.* [2012], le sentiment d'incarnation, incluant la localisation, l'agentivité et la possession, affecte la représentation de notre corps en réalité virtuelle. Cette théorie est en accord avec la définition de la notion de présence de soi de Biocca [1997]. Les différents éléments du sentiment de présence présentés par Lee [2004] sont indépendants, la présence de soi étant centrée autour de la relation qu'a l'utilisateur à son soi virtuel. C'est à partir de ces similarités que Gorisse *et al.* [2018] identifient les intrications entre la présence et l'incarnation et proposent un meta-modèle nommé « Présence - Incarnation », illustrant l'inclusion du sentiment d'incarnation dans la notion de la notion de présence de soi. Ces observations se retrouvent aussi dans les travaux de Sanchez-Vives et Slater [2005] et Kilteni *et al.* [2012] exposant un possible lien entre la présence et l'incarnation en environnement virtuel immersif (voir figure 2.4).

Si le sentiment d'agentivité a été défini en réalité virtuelle comme un élément clé du sentiment de présence, d'autres communautés scientifiques, telles que les neurosciences et la

FIGURE 2.4 – Meta-modèle « Présence - Incarnation » développé par Gorisse *et al.* [2018]

psychologie, ont proposé des théories complémentaires. C'est ainsi que Jeunet *et al.* [2018], proposent un modèle plus complet du sentiment d'agentivité, recoupant les définitions issues de la réalité virtuelle et des neurosciences. Le sentiment d'agentivité correspond à la sensation d'être la personne à l'origine de l'action [Gallagher, 2000]. Ils considèrent ainsi le sentiment d'agentivité comme une combinaison de la perception de l'agentivité et du jugement d'agentivité [Farrer et Frith, 2002; Gallagher, 2012; Synofzik *et al.*, 2008]. Ils s'inspirent des travaux de Banakou et Slater [2014], qui définissent ces deux composants comme « *la cause (intention d'action) précède l'effet (le résultats de l'action).* » La perception de l'agentivité est pré-réflexif, implicite, bas-niveau et non conceptuel, tandis que le jugement d'agentivité est réflexif, explicite, haut-niveau, de l'ordre de la croyance et conceptuel. La perception de l'agentivité précède le résultat de l'action (la perception du feedback), elle est déclenchée au début de l'action, tandis que le jugement de l'agentivité résulte du calcul de la comparaison entre la prédiction et les résultats réels de l'action (il est calculé une fois que le retour d'informations a été perçu et procédé). Synofzik *et al.* [2008] expliquent que le sentiment d'agentivité doit être conceptuellement traité pour qu'un jugement ou une attribution de l'agentivité se produise. En suivant les conclusions de Wegner et Wheatley [1999], Jeunet *et al.* précisent que pour expérimenter un jugement d'agentivité, trois principes doivent être respectés lorsque l'on fourni un retour d'informations :

1. Le principe de priorité : l'intention consciente d'effectuer un acte doit immédiatement précéder l'action, qui elle-même précède le résultats.
2. Le principe de constance : le résultat sensoriel doit correspondre au résultat prédit.
3. Le principe d'exclusivité : les pensées d'un individu doivent être les seules causes appa-

rentes du résultat (c'est à dire, on ne doit pas croire qu'il y a une influence extérieure).

Ainsi, Jeunet *et al.* [2018] mènent une expérimentation en réalité virtuelle, durant laquelle ils font varier différents éléments permettant d'influer sur les différents principes énoncés précédemment. Leurs résultats démontrent la véracité de leur approche du sentiment d'agentivité dans des expériences de réalité virtuelle. De plus, ils suggèrent que le Locus de Contrôle⁵ des utilisateurs influence leur sentiment d'agentivité.

Les travaux de Ventura *et al.* [2018], qui explorent les effets d'un système d'incarnation sur l'expérience utilisateur, font écho à ces conclusions. Dans l'expérience de la « Machine pour Être un Autre » (« *Machine to Be Another* »), un système permet de se voir depuis le point de vue d'un autre grâce à la réalité virtuelle. Cette illusion est rendue possible grâce à un acteur qui reproduit les mouvements de l'utilisateur. Les résultats de cette étude montrent que les participants croient être dans l'autre corps, avec une influence directe sur les trois composantes de l'incarnation, dont l'agentivité, et de fortes réactions émotionnelles (anxiété, étrangeté et inconfort).

Le sentiment d'agentivité pouvant naître de multiples manières, soit physique, physiologique ou encore émotionnelle, l'exploitation du maximum de canaux sensoriels et émotionnels offerts par les technologies du virtuel est nécessaire dans l'induction d'un fort sentiment d'immersion et donc d'une expérience utilisateur optimale.

5. Concept de psychologie, proposé par Julian Rotter en 1954, qui décrit le fait que les individus diffèrent dans leurs appréciations et leurs croyances sur ce qui détermine leur réussite dans une activité particulière, ce qui leur arrive dans un contexte donné ou, plus généralement, ce qui influence le cours de leur vie.

2.2 Données physiologiques pour des boucles de rétroaction biologique

2.2.1 Physiologie et émotions

Les émotions sont universelles, comme l'explique Ekman [2003], mais elles sont aussi idiosyncratiques selon la théorie de Darwin [1872]. Les différents traits de personnalité identifiés par l'Enneagramme des personnalités (voir figure 2.5) ou les différents buts fondamentaux des individus décrits dans la théorie de Reiss *et al.* [2001] et la pyramide des besoins de Maslow [1943], démontrent bien combien chacun, tout en étant semblable aux autres, en est aussi différent. C'est pourquoi de nombreuses études se sont attelées à essayer de comprendre le lien entre les personnalités émotionnelles des utilisateurs et le niveau d'activité de leur système autonome ou SNA⁶.

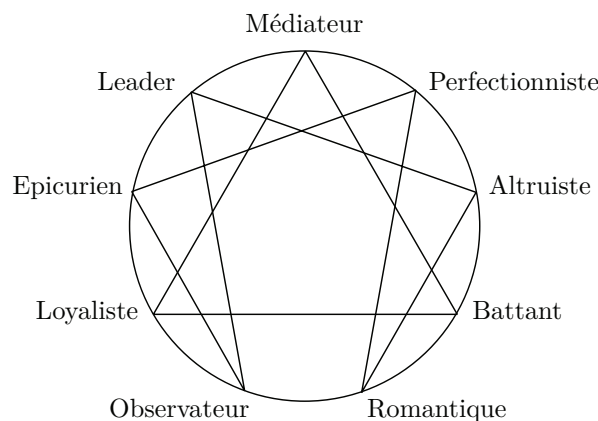


FIGURE 2.5 – Enneagramme des personnalités

Mehrabian et Russel [1974] développent le modèle *PAD* (*Pleasure, Arousal, Dominance*) ou « Plaisir, Stimulation, Domination » [Detandt *et al.*, 2017] pour décrire et mesurer les états émotionnels (cette approche dimensionnelle a déjà été introduite précédemment avec le modèle circomplexe des émotions figure 2.2). Ce modèle utilise trois dimensions numériques pour représenter l'intégralité des états émotionnels. Lang *et al.* [1990] l'utilisent ensuite pour proposer une théorie sur la physiologie des émotions. De ces études ont émergé de nombreux

6. Le système nerveux autonome ou système nerveux viscéral (aussi appelé système nerveux végétatif) est la partie du système nerveux responsable des fonctions non soumises au contrôle volontaire. Il contrôle notamment les muscles lisses (digestion, vascularisation...), les muscles cardiaques, la majorité des glandes exocrines (digestion, sudation...) et certaines glandes endocrines. Le système nerveux autonome contient des neurones périphériques mais aussi centraux.

travaux sur la catégorisation et la mesure des émotions [Bales, 2001].

Mesures physiologiques

La compréhension du lien entre l'activité physiologique et l'état psychologique (tel que la peur ou le stress) a suscité de nombreux travaux [Bradley et Lang, 1994; Cacioppo *et al.*, 2007; Cowie *et al.*, 2001]. Il a été démontré que les outils de neurophysiologie peuvent être utilisés pour permettre de mesurer les réponses lorsque des personnes sont engagées dans diverses activités (e.g. prise de décision) ou réagissent à des stimuli (e.g. interface informatique) [Dimoka *et al.*, 2012]. Ils présentent également un cadre théorique encadrant l'utilisation de la neurophysiologie dans l'étude des technologies informatiques. Plus récemment, Gregor *et al.* [2014] ont montré que l'utilisation d'un électroencéphalogramme permet, dans une certaine mesure, de prédire un comportement utilisateur ou un ressenti.

Si l'utilisation de l'électroencéphalographie semble être une solution prometteuse pour analyser et comprendre les émotions, sa mise en œuvre reste complexe. Ainsi, de nombreux chercheurs se penchent vers la mesure d'autres signaux pour estimer les états émotionnels, tels que la réponse électrodermale ou la conductance cutanée [Dawson *et al.*, 2007; Lang *et al.*, 1993]. Madhuri *et al.* [2017] présentent un système qui permet d'identifier les émotions basiques en temps réel *via* l'analyse de l'activité électrodermale : en relevant les données durant une journée et en les comparant avec les retours subjectifs des utilisateurs sur leurs états émotionnels, ils ont été capables d'établir des niveaux seuils leur permettant de classer les émotions. Cependant l'utilisation de la conductance cutanée uniquement ne permet pas d'obtenir une représentation complète du spectre émotionnel [Mirza-Babaei *et al.*, 2011]. Aujourd'hui, c'est l'activité cardiaque qui demeure l'une des méthodes les plus couramment utilisées, sa validité comme indice de valence et de stimulation ayant été démontrée [Ravaja, 2004]. Stoermer *et al.* [2000] ont également démontré que la variabilité de la fréquence cardiaque est une mesure puissante et simple à utiliser pour mesurer le niveau de stress.

Certains travaux font un usage conjoint de plusieurs signaux, à l'image de Wiederhold *et al.* [2002] qui mesurent la variabilité de la fréquence cardiaque, la conductance de la peau et la température corporelle couplées aux technologies du virtuel pour étudier les réponses physiologiques à des expositions à des situations phobiques et non-phobiques. Dans la lignée des travaux de Stoermer *et al.* [2000], ils démontrent ainsi que les participants à leur expérience ont des réponses physiologiques significatives lorsqu'ils sont exposés à des situations phobiques. Rainville *et al.* [2006] tentent de créer un modèle de détection d'émotions basiques en étudiant les facteurs cardio-respiratoires et indiquent un taux de détection d'émotion (joie,

peur, colère ou tristesse) supérieur à 60%. Ce chiffre, s'il peut paraître faible, illustre pleinement la difficulté d'identifier une émotion de manière fiable.

Traitement des données physiologiques

L'exploitation des données physiologiques brutes reste encore aujourd'hui complexe à appréhender, rendant incidemment limitée la reconnaissance des émotions.

L'utilisation de l'électrocardiographie pour la détection d'émotions s'est principalement concentrée autour de techniques de filtrage du signal pour l'analyse. Ferreira *et al.* [2016] étudient ainsi la possibilité d'exploiter le bruit du signal pour essayer d'en extraire des informations qui soient utilisables pour classifier des émotions. Ils confrontent leurs participants à des vidéos induisant des réactions émotionnelles (le dégoût, la peur, ou une émotion neutre), puis leur demandent de compléter un questionnaire sur les émotions ressenties (le *Stait-Trait Anxiety Inventory*, STAI [D. Spielberger *et al.*, 1983] et le *Positive and Negative Affect Scale*, PANAS [Watson *et al.*, 1988]) afin de vérifier la validité de l'induction. Leur système de classification retourne des résultats très positifs : sur l'émotion neutre, le taux de détection est parfait (100%), il est de 85% pour la peur et de 79% pour le dégoût. Ils tempèrent cependant leur résultats, en indiquant que s'ils sont très encourageants, la méthode basée sur l'analyse du bruit peut amener à une perte importante d'informations.

Certains travaux récents s'appuient sur des techniques plus avancées de réseaux de neurones et d'apprentissage automatique pour lier réponse physiologique et émotion correspondante. Ainsi, Nakasone *et al.* [2005] utilisent une catégorisation de la micro sudation *via* un réseau Bayésien. He *et al.* [2016] utilisent la mesure de l'activité cardio-respiratoire couplé à un algorithme génétique pour la sélection des fonctionnalités clés (*survival of the fittest*) et les classent ensuite avec une machine à vecteurs de support. Cela permet d'obtenir une détection forte de la joie, mais des résultats plus mitigés sur les autres émotions basiques (tristesse, colère, plaisir). Anderson *et al.* [2017] utilisent des algorithmes d'apprentissage automatique pour classifier la stimulation émotionnelle lorsqu'une personne est soumise à 3 stimuli différents (musique, vidéos et jeux) en utilisant la conductance cutanée, l'activité cardiaque et l'électroencéphalogramme. Leur résultats de détection d'émotions sont très élevés pour les stimuli vidéos et musicaux. Ces algorithmes d'apprentissage automatique sont mis en concurrence par Myroniv *et al.* [2017] pour entraîner le modèle de classification (arbre aléatoire, arbre de décision J48, classification Bayes naïve, machine à vecteurs de support, algorithme des K voisins proches et réseau de neurones perceptron multicouche). Ils présentent aux participants des images induisant de l'émotion (positive, neutre, négative) et tentent de

détecter correctement la réponse émotionnelle. Certains algorithmes se montrent très performants (97% de précision pour l'algorithme des K voisins), tout en utilisant des capteurs financièrement abordables.

Si les résultats présentés précédemment semblent très positifs sur la détection automatique d'émotions, il faut garder à l'esprit qu'ils sont obtenus dans des conditions d'expérience *ad-hoc*. La relation entre activité physiologique et état psychologique reste pour autant très fortement dépendante des influences environnementales. On peut également observer que si de nombreuses méthodes permettent l'estimation des émotions par la mesure de données physiologiques, aucune ne permet de reconnaître l'ensemble des émotions ; il n'existe à ce jour pas de classifieur universel ni standard absolu [Mauss et Robinson, 2009].

Données physiologiques et expérience utilisateur

Au delà de la « simple » reconnaissance des émotions, plusieurs études se sont basées sur les travaux d'analyse et de classification des signaux physiologiques pour essayer de mieux comprendre l'expérience utilisateur, d'une manière plus globale, dans le cadre d'interactions homme-machine et de manière plus spécifique dans le jeu vidéo et les environnements immersifs.

Mirza-Babaei *et al.* [2011] tentent ainsi de quantifier la valeur des données biométriques comme méthode d'analyse de l'expérience utilisateur dans le développement de jeux vidéo. Ils concluent que l'observation permet une meilleure détection des problèmes liés aux mécaniques de jeu, tandis que la physiologie permet une meilleure détection des problèmes de gameplay et d'immersion émotionnelle. Dans leur revue de littérature des méthodes psychophysiologiques utilisées dans la recherche sur les jeux vidéos, Kivikangas *et al.* [2011] relèvent les avantages d'utiliser des données telles que l'activité musculaire, cardiaque ou la conductance cutanée pour obtenir des informations objectives sur l'expérience utilisateur. Si ces données ont été corrélées à la valence, la stimulation, l'effort cognitif ou encore le stress dans la compréhension de l'expérience de jeu, Kivikangas *et al.* notent qu'une part importante des recherches se concentre sur la création de systèmes de jeux adaptatifs.

Le lien entre certaines dimensions de l'expérience utilisateur, comme l'engagement et le *flow*, et les mesures physiologiques a ainsi suscité l'intérêt de la communauté scientifique. Bian *et al.* [2016], en comparant mesures physiologiques (fonctions cardio-vasculaire et respiratoire ainsi que le sourire du joueur *via* un électromyographe sur le visage) et données de questionnaire (*Flow Short Scale* [Rheinberg *et al.*, 2003]), ont déterminé qu'il existe une relation

linéaire entre l'activité cardiovasculaire et le *flow*. Les résultats indiquent qu'une augmentation du rythme cardiaque, une diminution de l'intervalle inter-battement et une augmentation de la variabilité du rythme cardiaque pourrait, de manière significative, prédire une augmentation du *flow*, tout comme une augmentation du rythme respiratoire. Moghimi *et al.* [2017] construisent une base d'analyse de données psychophysiologiques permettant d'interpréter leur impact sur l'engagement, l'immersion et les émotions des joueurs en RV. Ils enregistrent les valeurs d'EEG, de conductance cutanée et de rythme cardiaque des joueurs lors d'une partie de jeu en réalité virtuelle. Les participants doivent ensuite évaluer leur expérience émotionnelle moyenne selon la dimension (valence, stimulation et domination) et la catégorie (relaxé, satisfait, heureux, excité, en colère, effrayé, triste, ennuyé). Ils testent différents algorithmes de reconnaissance des émotions (les K voisins les plus proches et la machine à vecteur de support), dont les taux de reconnaissance supérieurs à 90%, suggèrent la possibilité que les signaux physiologiques puissent être utilisés pour la détection de l'expérience émotionnelle en RV.

Si les données physiologiques semblent permettre d'analyser les composantes fondamentales de l'UX, certains chercheurs tentent aussi d'utiliser ces données pour mesurer objectivement les conséquences de celle-ci. Pour essayer de quantifier la qualité d'une interaction en environnement virtuel, Rieder *et al.* [2017] mettent en place une méthodologie de test, de normalisation et de techniques statistiques considérant l'utilisation de mesures physiologiques. Les résultats établissent une corrélation entre les données physiologiques mesurées et les niveaux de satisfaction des participants selon la technique d'interaction utilisée. Les auteurs concluent ainsi que les mesures physiologiques peuvent être utilisées pour révéler la qualité d'une technique d'interaction pour une tâche donnée, et par conséquent, l'évaluation préliminaire d'un système peut être effectuée en utilisant ce type d'analyses.

L'utilisation des données physiologiques permet aussi de mesurer les réactions des utilisateurs à des situations simulées ou des expériences d'entraînements ciblées. Un exemple est la mesure du niveau d'anxiété et de stress d'une personne confrontée à la simulation d'entretien d'embauche en réalité virtuelle [Villani *et al.*, 2016]. Pour mesurer les réponses émotionnelles des participants, ils utilisent le *State Trait Anxiety Inventory* (questionnaire sur le niveau d'anxiété) [D. Spielberger *et al.*, 1983] et la mesure de l'activité cardio-vasculaire. Les participants sont confrontés aléatoirement, soit à un entretien d'embauche simulé en réalité virtuelle, soit à une méthode plus traditionnelle (accompagnée d'un livre vendu dans le commerce). Les résultats de cette expérience démontrent une réduction du niveau d'anxiété des participants exposés à l'entretien en RV, *via* les mesures physiologiques et les réponses au questionnaire.

Villani *et al.* observent ainsi des différences significatives de l'activité cardio-vasculaire entre les deux sessions. En effet, il y a une réduction significative du rythme cardiaque ainsi que du ratio entre les fréquences cardiaque basses et hautes lors de la deuxième session, confirmant une réduction du niveau d'anxiété. Ces résultats indiquent l'adéquation de la RV pour induire un sentiment similaire à la réalité et donc son utilisabilité pour l'entraînement à la gestion des émotions. Dans le cadre d'une autre expérience de gestion du stress en réalité virtuelle, Mahalil *et al.* [2017] montrent qu'il est possible d'induire des états émotionnels par des environnements virtuels, ici la modulation du niveau de relaxation, et qu'il y a un lien entre rythme cardiaque et niveau de relaxation.

Nous avons mis en avant dans cette section le lien entre données physiologiques et émotions. De nombreux type de données ont été exploités pour réussir à détecter et comprendre les émotions humaines. A ce jour s'il n'existe pas de standard pour la classification des émotions grâce à la physiologie, plusieurs indices physiologiques peuvent être interprétés pour reconnaître des réactions psychophysiologiques. Ces indices ont notamment été exploités pour mieux comprendre l'expérience utilisateur dans des applications interactives et de réalité virtuelle. Ainsi, s'il est possible de mieux comprendre l'expérience utilisateur grâce aux données physiologique, il est imaginable d'augmenter cette expérience en modulant l'application en fonction de l'état psychophysiologique de l'utilisateur ou en exploitant directement ces données physiologiques.

2.2.2 Rétroaction physiologique ou *biofeedback*

L'Association pour l'Application de la Psychophysiologie et le *Biofeedback* (AAPB) définit la rétroaction physiologique ou *biofeedback* comme « *un processus qui permet à un individu d'apprendre comment changer son activité physiologique avec pour objectif d'améliorer sa santé et ses performances. Des instruments précis mesurent l'activité physiologique telle que l'activité cérébrale, les fonctions cardiaques, la respiration, l'activité musculaire et la température corporelle. Ces instruments renvoient rapidement et avec précision les informations à l'utilisateur. L'affichage de ces informations, souvent en lien avec des changements de mode de pensée, d'émotions et de comportements, aide à produire les changements physiologiques désirés. Avec le temps, ces changements peuvent perdurer sans l'utilisation continue d'un instrument de mesure.* » [Association for Applied Psychophysiology and Biofeedback, 2018]. Plus simplement, Riedl *et al.* [2014] définissent le *biofeedback* comme « *un système qui reconnaît l'état physiologique d'un utilisateur et s'adapte en temps réel, à partir de cette information* » (voir la figure 2.6).

Dans leurs travaux, Lux *et al.* [2018] notent que la recherche autour du *biofeedback* s'est intensifiée au cours des 15 dernières années, et mettent en évidence trois types de *biofeedback* :

- De soi-à-soi : l'utilisateur perçoit ses propres informations physiologiques.
- De soi-à-autrui : les données physiologiques de l'utilisateur sont transmises à un autre utilisateur.
- D'autrui-à-soi : l'utilisateur perçoit les informations physiologiques d'un autre utilisateur.

Ils mettent également en avant que les systèmes de *biofeedback* répondent à deux constructions distinctes. La première est une architecture directement associée avec l'activité physiologique. C'est-à-dire qu'il existe une dimension physiologique centrale à la situation (comme par exemple le stress ou l'excitation). Pour cette architecture, le système de *biofeedback* est généralement construit pour aider l'utilisateur à développer des capacités perceptives (la capacité à sentir sa propre activité physiologique ou celle d'un autre participant) [Craig, 2003; Dunn *et al.*, 2010]. Ces capacités peuvent permettre d'augmenter la cohérence entre la dimension physiologique et la perception [Bonanno et Keltner, 2004; Mauss *et al.*, 2005]. De plus, renforcer les capacités introspectives peut aider les utilisateurs à adapter leur comportement et réguler leur réponse physiologique [Al Osman *et al.*, 2013; Riedl et Léger, 2016]. En particulier, Green *et al.* [1970] ont émis le concept de la boucle esprit-corps, un principe physiologique qui décrit que des changements de l'état psycho-émotionnel peuvent affecter l'activité physiologique et inversement.

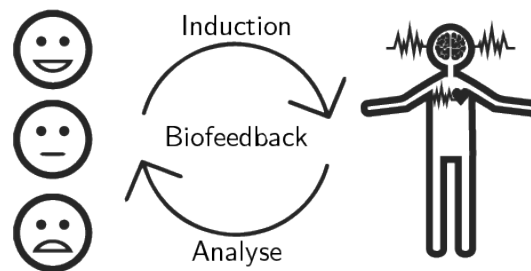


FIGURE 2.6 – Illustration schématique du *biofeedback*

La seconde construction est basée sur une architecture indirectement associée avec l'activité physiologique. Par exemple, fournir à des utilisateurs un retour de leur propre activité physiologique ou de celle d'un autre peut améliorer leur expérience ou faciliter l'interaction sociale. Ainsi, fournir un retour d'information physiologique va entraîner un changement de l'expérience vécue par l'utilisateur sans pour autant la modifier fondamentalement. En ce sens, différentes études ont examiné comment un utilisateur peut se servir du *biofeedback* pour altérer des situations sociales, pour augmenter la présence sociale [Järvelä *et al.*, 2016], le

plaisir d'une activité sociale [Stach *et al.*, 2009], aider les expériences d'effort social [Walmink *et al.*, 2013] ou encore réduire le stress lors de tâches de collaboration [Tan *et al.*, 2014].

2.2.3 Auto-efficacité

A la recherche d'un meilleur contrôle et d'une meilleure connaissance de soi, l'être humain a exploré de nombreux domaines, parmi ceux-ci, l'auto-efficacité ou efficacité personnelle. Celle-ci constitue la croyance qu'a un individu en sa capacité à réaliser une tâche [Bandura, 1982, 1993]. Selon Bandura [1997] l'efficacité personnelle s'étend jusqu'à l'état physiologique et émotionnel. Il définit quatre sources de construction de l'efficacité personnelle (traduction de Lecomte [2004]) :

- La maîtrise personnelle : « *C'est la principale source : les succès construisent une solide croyance d'efficacité personnelle tandis que les échecs la minent. Cependant, pour ceux qui disposent d'un bon sentiment d'efficacité, les revers et difficultés peuvent être bénéfiques, car ils enseignent que le succès nécessite généralement un effort soutenu.* ».
- L'apprentissage social : « *Pour évaluer ses capacités, l'individu tire aussi des conclusions de l'observation des actions réalisées par d'autres personnes. Ce sont les sujets dont les caractéristiques (âge, sexe, etc.) sont les plus proches des siennes qui sont les plus susceptibles d'être source d'information. Par exemple, des enfants tirent un sentiment d'efficacité personnelle plus élevé s'ils observent d'autres enfants talentueux que s'ils voient des adultes manifester les mêmes aptitudes cognitives.* ».
- La persuasion par autrui : « *Il est plus facile à quelqu'un de maintenir un sentiment d'efficacité, particulièrement quand il est confronté à des difficultés, si d'autres individus significatifs lui expriment leur confiance dans ses capacités. Cependant, cet effet se manifeste surtout si la personne a déjà de bonnes raisons de croire qu'elle est performante. Dans ce cas, les commentaires positifs de son entourage peuvent l'aider à fournir les efforts nécessaires pour réussir. Par contre, susciter des croyances irréalistes de capacités personnelles peut conduire à l'échec, ce qui discréditera le flatteur et sapera les croyances de la personne en ses capacités.* ».
- L'état physiologique et émotionnel : « *En évaluant ses capacités, une personne s'appuie en partie sur l'information transmise par son état physiologique et émotionnel. Les indices que fournit le corps sont particulièrement pertinents dans la santé, les activités physiques et la gestion du stress. Les techniques qui permettent de réguler les réactions émotionnelles élèvent les croyances en l'efficacité de gestion du stress, et provoquent les améliorations correspondantes de performance.* ».

C'est cette dernière source de construction de l'efficacité personnelle qui se révèle intéressante dans le cadre de nos travaux. Ainsi, *via* un meilleur contrôle de nos réponses physiologiques, il serait possible de mieux contrôler nos réponses émotionnelles et, par là même, notre santé [Muris, 2001]. Ainsi, de nombreux travaux scientifiques se sont attachés à déterminer notre capacité à influencer nos signaux physiologiques et à comprendre quels étaient les mécanismes en jeu.

Contrôle volontaire du rythme cardiaque

Comme nous l'avons montré précédemment, la fréquence cardiaque est un indicateur fort de l'état psychophysiologique [Sarkar *et al.*, 2014], car elle est modulée en réponse à un stimulus émotionnel (stress, peur, joie). De nombreuses études ont été menées pour comprendre quel était le mécanisme de contrôle en jeu [Clynes, 1960; Davies et Neilson, 1967; Westcott et Huttenlocher, 1961]. Sroufe [1971] a étudié, par une série d'expériences, les effets de la profondeur de la respiration et du rythme respiratoire sur la variabilité de la fréquence cardiaque. Au cours de ces expériences, les participants devaient respirer selon un schéma prédéterminé (lent, régulier ou rapide) et une profondeur définie (peu profonde ou moyenne). Les résultats indiquent que le rythme respiratoire n'affecte pas la fréquence cardiaque, contrairement à la profondeur de la respiration, en accord avec les travaux antérieurs de Clynes [1960] et Westcott et Huttenlocher [1961]. De plus, Sroufe [1971] indique qu'un entraînement, associé à la démonstration des effets sur la fréquence cardiaque d'une série de schémas respiratoires, semble permettre aux participants une acquisition plus rapide du contrôle direct de la fréquence cardiaque. Malcuit et Beaudry [1980] soulignent la capacité des participants à ralentir volontairement leur fréquence cardiaque immédiatement après un événement provoquant un stress (événement qui provoque une accélération de la fréquence cardiaque). Grossman [1983] démontre qu'une modulation volontaire du rythme respiratoire peut aider à modifier la fréquence cardiaque et à moduler l'expérience subjective des situations stressantes.

Les études citées précédemment, ainsi que celles menées par Manuck *et al.* [1975] et Stephens *et al.* [1975], démontrent la capacité des participants à contrôler volontairement leur fréquence cardiaque. Si de nombreuses études insistent sur l'importance de l'expérience dans le contrôle de la fréquence cardiaque, l'intérêt d'un retour d'information direct ne fait pour autant pas l'objet d'un consensus. En effet, Manuck *et al.* [1975] indiquent que leurs résultats n'appuient pas l'hypothèse selon laquelle le retour d'information facilite immédiatement le contrôle volontaire de la fréquence cardiaque. Ils expliquent que le retour d'information n'a d'effets significatifs qu'après plusieurs séances de test. Whitehead *et al.* [1977] arrivent à des conclusions similaires, en démontrant que la perception du battement cardiaque, dans leur

expérience, ne permet pas un meilleur apprentissage des mécaniques de contrôle cardiaque. Holmes *et al.* [1979] ont étudié les effets séparés et combinés de la respiration et du retour d'information sur le contrôle de la fréquence cardiaque. Ils démontrent qu'il est possible d'accélérer son propre rythme cardiaque par la respiration, mais ils ne trouvent pas de preuve d'un impact significatif du retour d'information sur le contrôle du rythme cardiaque. Des conclusions similaires, concernant les apports immédiats du *biofeedback*, sont tirées par la suite par Malcuit et Beaudry [1980]. Ces résultats contredisent ceux de nombreuses études précédentes, indiquant l'intérêt d'un retour d'information dans l'apprentissage du contrôle de l'activité cardiaque [De Good et Adams, 1976; Goldstein *et al.*, 1977; Larkin *et al.*, 1989].

Performances et régulation émotionnelle

Puisqu'il a été démontré qu'il est possible de contrôler volontairement son rythme cardiaque, certaines études se sont donc intéressées à l'impact de ce contrôle sur la performance ou sur la régulation émotionnelle. Ainsi Larkin *et al.* [1990] ont cherché à évaluer, en utilisant un jeu vidéo (une version adaptée de *Snocat*⁷), à évaluer dans quelle mesure les participants sont capables de réduire leur réaction cardiaque face au défi proposé par le jeu, après un entraînement de *biofeedback* grâce des séances répétées. Ils essaient ainsi de déterminer si les participants sont capables d'apprendre à réduire leur fréquence cardiaque sans diminuer leur performance de jeu. Leurs résultats indiquent une réponse cardiaque plus faible après l'entraînement, et les auteurs notent par ailleurs aussi que la fréquence cardiaque est généralement plus basse pour les participants ayant accès au retour d'information, ce qui est conforme à de multiples travaux précédents [McCanne, 1983; Perski et Engel, 1980; Sirota *et al.*, 1974, 1976]. Cependant, ils notent que les groupes qui ont bénéficié du retour d'information démontrent une moins bonne performance en jeu, et supposent que les participants ont éprouvé des difficultés à s'appropriier simultanément les mécaniques de jeu et de contrôle cardiaque.

Peira *et al.* [2014] étudient l'effet du *biofeedback* pour la régulation de la réponse émotionnelle lorsqu'une personne est confrontée à des émotions négatives. L'état émotionnel des participants est calculé *via* le rythme cardiaque et affiché sous la forme d'un changement de couleur de l'arrière plan, si le rythme cardiaque augmente il tend vers le rouge, s'il diminue l'arrière plan tend vers le vert. Les participants regardent des images induisant une émotion négative ou neutre et doivent essayer de réguler leur réponse physiologique. Peira *et al.* mettent en place quatre blocs expérimentaux : régulation avec feedback, régulation avec un feedback faussé, observation des images avec feedback et observation des images avec un feedback faussé. Les résultats montrent que lorsque les participants sont confrontés aux images

7. Andy Keplinger - 1984

négatives, le feedback réel les aide à mieux réduire leur rythme cardiaque, par rapport au feedback faussé. Ils concluent qu'il est possible de réduire son rythme cardiaque lorsque cela est demandé et que le feedback aide à le faire lorsque l'on est confronté à des stimuli négatifs, ce qui n'est pas observable lorsque le stimulus est neutre. Ainsi, cela démontre l'intérêt du contrôle volontaire du rythme cardiaque pour la régulation émotionnelle.

Les études présentées précédemment démontrent la capacité d'une personne à influencer sa propre fréquence cardiaque, grâce notamment à la respiration. De plus, elles nous permettent de présenter les prémisses d'un lien entre le contrôle volontaire du rythme cardiaque et les applications interactives. Cela suggère ainsi que le *biofeedback* pourrait être un levier potentiel pour *in fine* moduler et augmenter l'expérience utilisateur.

2.2.4 Le *biofeedback* comme interface d'interaction

Si la captation de données physiologiques a montré son potentiel dans la reconnaissance d'états émotionnels et que le *biofeedback* semble être un apport pour l'acquisition d'un meilleur contrôle de nos réactions psychophysiologiques, il a aussi longuement été étudié dans le domaine des interactions homme-machine. Il fait partie de ce qui a été défini par Picard [1995] comme étant l'*Informatique Affective* (l'informatique qui se rapporte, naît de, ou influence les émotions). Ainsi, intégré dans une expérience interactive en tant qu'interface, le *biofeedback* peut servir différents objectifs. Bersak [2001] présente ainsi le concept d'« *Affective Feedback* », signifiant que l'ordinateur doit être un participant actif et intelligent dans une boucle de *biofeedback*. De nombreux travaux se sont donc intéressés à l'étude du *biofeedback* comme mécanique dans le domaine du jeu, qu'il soit « classique » ou sérieux. Nacke *et al.* [2011] étudient ainsi l'utilisation du *biofeedback* direct (données volontairement contrôlées par l'utilisateur) et indirect (données non contrôlées par l'utilisateur) pour augmenter une expérience vidéoludique classique, sans en remplacer les contrôles traditionnels. Les signaux directs qu'ils considèrent sont l'oculométrie, la flexion musculaire, la respiration et le changement de température du souffle. Les signaux indirects sont le rythme cardiaque et la conductance cutanée. Ces informations physiologiques ont un effet sur différents éléments du jeu afin d'augmenter l'expérience (par exemple la vitesse de déplacement du personnage ou encore les conditions météorologiques). Les résultats de cette expérience indiquent que les participants apprécient fortement l'augmentation physiologique de l'expérience et qu'ils préfèrent les contrôles directs. Ils mettent en avant l'intérêt du *biofeedback* indirect pour altérer l'environnement et non pas les mécaniques d'interactions directes. Dans la lignée de ces travaux, da Silva *et al.* [2014] apportent une définition des deux modalités de *biofeedback* :

- *biofeedback* direct : le joueur manipule activement son état physiologique (relaxation musculaire, volume thoracique, etc. . .), ce qui est reconnu par le système pour déclencher une action ou un effet dans le jeu. L'hypothèse étant que le joueur est un agent actif dans le flux de données physiologiques.
- *biofeedback* indirect : le joueur n'essaie pas de manipuler ses données physiologiques. A l'inverse, le système reçoit les données physiologiques et les utilise pour modifier son comportement. Dans ce cas le joueur est un agent passif et il peut ne jamais être conscient de la façon dont les données enregistrées affectent le jeu.

Si l'utilisation d'un *biofeedback* actif peut permettre d'augmenter l'engagement de l'utilisateur dans une application interactive, en y ajoutant de nouvelles mécaniques de jeu, son utilisation de manière passive a été étudiée pour mesurer l'état psychophysiologique du joueur et le maintenir dans un état d'expérience optimal. Nous allons, dans la suite de cette partie, évoquer les travaux relatifs à cette catégorisation du *biofeedback*.

Utilisation d'un *biofeedback* passif dans des applications interactives

Dans une étude fondamentale sur la conception de jeux affectifs, Gilleade *et al.* [2005] suggèrent qu'une simple rétroaction affective peut être utilisée pour créer des expériences de jeu plus engageantes. Ils insistent sur la criticité de proposer des expériences adaptées aux différences de niveaux entre joueurs et définissent ainsi des règles de *level design* pour les jeux affectifs :

- « Aide-moi » : mesurer la frustration d'un joueur en utilisant la physiologie. Combiné au contexte du jeu, cela permet d'identifier les situations problématiques et d'ajuster le *gameplay* pour réduire le stress.
- « Challenge-moi » : mesurer le niveau d'engagement au travers du niveau de stimulation pour altérer le niveau de difficulté offert par le jeu, s'adaptant mieux à chaque joueur.
- « Émeus-moi » : mesurer l'état émotionnel du joueur pour que le jeu modifie son contenu pour provoquer l'émotion attendue.

Il y a donc ici l'idée que le *biofeedback* soit utilisé comme levier de modulation du *gameplay*, afin de proposer une expérience engageante et agréable. C'est dans cette optique que Rani *et al.* [2005] présentent un *design pattern* pour l'utilisation d'une rétroaction en temps réel de l'état affectif d'un joueur pour maintenir un niveau de difficulté optimal. Les résultats de leur étude indiquent une forte corrélation entre le niveau d'anxiété observé par la physiologie et celui rapporté par les participants. Ainsi ils concluent que les signaux physiologiques sont

un bon indicateur de l'affect et qu'ils peuvent être utilisés dans le domaine de l'interaction homme-machine, permettant de rendre une expérience plus exigeante sans pour autant créer de la frustration. Des travaux ont donc exploité ces potentialités pour en mesurer les effets. Parnandi et Gutierrez-Osuna [2015] présentent un jeu adaptatif, par captation physiologique (conductance cutanée), qui maintient la stimulation du joueur en modifiant la difficulté. Il s'agit d'un jeu de course durant lequel le *biofeedback* va permettre de moduler la météo (pluie, neige et brouillard), le contrôle des virages ou la vitesse du véhicule. L'intérêt de cette étude réside dans les équations de modulation de la difficulté, les résultats suggérant que leur modèle peut être utilisé pour l'analyse de la sensibilité du système par rapport à ses variables (contrôleur, mécaniques de jeux, physiologie, etc...). Avec le même objectif, Nogueira *et al.* [2016] ont réalisé une étude basée sur un jeu d'horreur, dans lequel le niveau de difficulté est ajusté dynamiquement pour stabiliser l'état émotionnel du joueur, en altérant les paramètres de génération de l'environnement. Les résultats démontrent que, grâce à cette mécanique, l'expérience ressentie est plus immersive et émotionnellement plus gratifiante pour les participants. Ils indiquent que l'utilisation du *biofeedback* pour moduler l'état affectif des participants n'est pas cantonné au cadre de l'horreur mais peut également s'appliquer dans d'autres types de jeux. Ils précisent enfin qu'il existe différentes relations orthogonales entre les dimensions d'expérience des joueurs (immersion et tension opposé à la tension et le *flow*) et que cela ne permet pas à tous les joueurs d'atteindre des configurations d'expérience optimales. Ainsi donc il nous est possible, notamment grâce aux travaux de Nacke *et al.* [2011] et de Nogueira *et al.* [2016], de mettre en lumière l'effet positif de l'inclusion d'un *biofeedback* sur le sentiment d'engagement dans des applications interactives (voir figure 2.7).

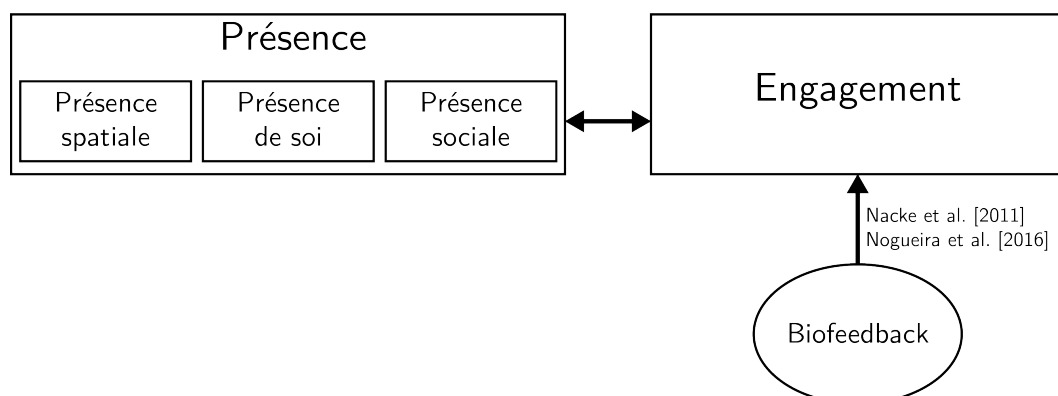


FIGURE 2.7 – Illustration des intrications entre le *biofeedback* et les sentiments de présence et d'engagement

Ces mécaniques de maintien de l'utilisateur dans un état de *flow* ont été étudiées dans le cadre de *serious games*. En effet, la motivation étant souvent la limite de ce type d'expé-

riences, les joueurs se désintéressant de l'action qu'ils doivent effectuer. Il est important de les maintenir engagés pour qu'ils bénéficient au maximum de leur expérience. Schrader *et al.* [2017] expliquent l'importance de l'ajustement des caractéristiques d'un jeu en fonction des états émotionnels du joueur. Ils définissent cette adaptabilité comme une approche centrée-joueur permettant d'ajuster les mécaniques de jeu et les modes de représentation par rapport aux caractéristiques du joueur, avec pour objectif d'améliorer l'expérience, l'apprentissage et la performance. L'intérêt d'une adaptabilité basée sur les émotions est ainsi de rendre inutile l'établissement d'un modèle type universel de joueur, l'expérience s'adaptant à tous. L'intérêt de l'adaptabilité dans le maintien de niveau de *flow* est souligné par d'autres études [Alves *et al.*, 2018; Tadayon *et al.*, 2018], même si le faible nombre de participants limite la portée de ces résultats. Ces études démontrent de plus la viabilité de la détection des émotions pour l'adaptation de l'expérience de jeu.

Sans aller jusqu'à une modulation dynamique du *gameplay* et du jeu en lui-même, le *biofeedback* peut simplement être utilisé pour induire des états physiologiques, forcer une réaction et donc moduler l'expérience vécue. C'est pour augmenter l'immersion dans une expérience d'horreur que Ueoka et Ishigaki [2015] et Ueoka et AlMutawa [2018] développent un système de *pseudo-feedback*, *via* un battement cardiaque. Les participants de leur expérience regardent un film d'horreur, placés dans une « boîte » avec simplement des trous au niveau des yeux pour regarder le film. De plus, le sol est équipé d'un système vibro-tactile pour simuler le rythme cardiaque. En opposant deux conditions (vibration dépendante du rythme cardiaque de l'utilisateur ou prédéterminée) et une condition de contrôle sans la vibration, les auteurs démontrent que le *feedback* donne une forme de rémanence à l'expérience d'horreur et qu'il est plus impactant quand il est basé sur le rythme cardiaque de l'utilisateur. Il est ainsi possible de contrôler la réaction émotionnelle à l'horreur d'une personne *via* des stimuli audio et tactile. Si l'émotion étudiée et la mécanique sont différentes, l'objectif de ces travaux se rapprochent de ceux de Costa *et al.* [2016], qui démontrent qu'en fournissant un retour tactile simulant le rythme cardiaque, *via* un bracelet, il est possible d'influencer le niveau d'anxiété d'un utilisateur.

Utilisation d'un *biofeedback* actif dans des applications interactives

Contrairement au *biofeedback* passif, sa déclinaison active demande à l'utilisateur un contrôle volontaire de son état physiologique pour réussir la tâche qui lui est proposée. Les travaux de da Silva *et al.* [2014], dans la suite de ceux de Nacke *et al.* mentionnés précédemment, permettent de mieux définir et comprendre l'utilisation du *biofeedback* comme interfaces de contrôle de jeu. Ils développent ainsi un jeu de tir à la première personne avec trois modes :

classique (clavier et souris), unimodale (un signal physiologique par mécanique de jeu) et multimodale (deux signaux physiologiques par mécanique de jeu). da Silva *et al.* supposent qu'en introduisant plus d'aspects physiologiques dans un jeu, il est possible d'augmenter « l'essence d'interactivité » [Laura et Frans, 2005] portée par ces données. Les données physiologiques considérées sont l'activité respiratoire, la température corporelle, un électromyogramme sur le bras, un électromyogramme sur la jambe et un gant de données captant des informations sur le mouvement de la main. Les participants trouvent dans l'ensemble les versions augmentées supérieures à la version classique (intérêt/amusement, effort/importance, pression/tension, liberté de choix perçue, valeur/utilité et connexité), même s'il n'y a pas de différences observées entre les deux versions avec *biofeedback*. Il est aussi intéressant de noter que l'ajout du *biofeedback* n'a pas entraîné une injouabilité. L'intérêt pour l'augmentation d'un jeu par un *biofeedback* se retrouve dans les travaux de Dekker et Champion [2007] qui intègrent la mesure de l'activité cardiaque et de la conductance cutanée dans un jeu de tir à la première personne (une version modifiée de Half-Life 2⁸). Les signaux physiologiques servent ici à modifier différents aspects du jeu (le volume sonore de l'environnement, ajout d'un effet *Bullet time*⁹, vitesse de l'avatar, etc...). La majorité des participants reconnaissent que les informations physiologiques peuvent augmenter l'engagement et améliorer l'expérience. L'étude de Kuikkaniemi *et al.* [2010], présente un nouveau patron de construction pour les jeux augmentés par *biofeedback* : l'identification au personnage. Ils créent pour l'occasion *Emoshooter*, un jeu de tir à la première personne augmenté par *biofeedback* (respiration, conductance cutanée et électromyographie). Dans leur jeu, la physiologie va affecter le déplacement, la visée et le tir. Les participants ont rapporté une grande hausse de l'immersion lors de l'utilisation des conditions physiologiques, ils ont particulièrement apprécié ces augmentations. Kalansooriya *et al.* [2016] étudient comment le rythme cardiaque et le rythme respiratoire, utilisés comme moyens d'interaction actifs, peuvent influencer le ressenti utilisateur. Leurs participants considèrent que l'utilisation de leur signaux physiologiques rend l'expérience plus naturelle, comparé à la modalité où les modifications suivent une courbe sinusoïdale simulée.

Au-delà de la portée ludique de l'ajout de *biofeedback* comme mécanique de jeu, il est possible de favoriser l'apprentissage du contrôle physiologique par les utilisateurs. Cela pourra leur permettre d'améliorer leur réaction *a posteriori*, lorsqu'ils seront confrontés à des situations induisant des émotions particulières, comme le stress [Zafar *et al.*, 2018]. Bersak [2001] propose ainsi un jeu de course compétitif dans lequel, plus le joueur est relaxé, plus son véhicule va vite. La mesure du niveau de stress/relaxation s'effectue ici grâce à la conduc-

8. Valve Corporation - 2004

9. Pendant une phase de tir, ralentissement du mouvement des adversaires, le personnage subjectif restant à vitesse constante.

tance cutanée. Si les participants ont de grandes difficultés à prendre en main les mécaniques de jeu dans un premier temps, ils gagnent rapidement un bon contrôle sur leur niveau de stress et arrivent mieux à détecter ce qui le provoque. Cette idée d'acquisition de compétences transposables dans la vie « réelle » se retrouve dans les travaux de Lobel *et al.* [2016], qui étudient l'intérêt du jeu d'horreur augmenté par *biofeedback* Nevermind¹⁰ comme outil psycho-éducatif. Parnandi et Gutierrez-Osuna [2018] s'intéressent à l'efficacité de deux mécanismes de *biofeedback* qui aident à l'acquisition de techniques de respiration grâce à une version modifiée du jeu Frozen Bubble¹¹. Dans cette version il faut réduire sa réponse émotionnelle (calculée par rapport au rythme respiratoire) pour limiter l'augmentation de la difficulté. Là encore, les résultats indiquent que le jeu augmenté par *biofeedback* favorise un transfert des compétences, en aidant les participants à réduire leur rythme respiratoire.

L'intérêt de ces mécaniques actives pour l'apprentissage du contrôle physiologique a également été prouvé dans le cadre d'expériences collaboratives. Muñoz *et al.* [2016a] mènent une étude visant à démontrer la faisabilité d'un jeu multi-joueurs collaboratif ayant pour objectif de promouvoir l'empathie chez les adolescents en leur faisant partager leurs données psychophysiologiques (activité cérébrale et respiratoire). Celles-ci permettent l'utilisation de pouvoirs spéciaux qui sont nécessaires à la complétion des différentes épreuves. Les participants de leur étude rapportent la difficulté de prise en main de ces mécaniques de jeu mais affirment qu'ils ont eu un très fort niveau de plaisir à utiliser ces mécaniques de jeu. De plus, ils mentionnent aussi l'intérêt des compétences promues par le jeu dans leur quotidien (la concentration et la relaxation).

Biofeedback et réalité virtuelle

Dans une expérience de réalité virtuelle, les sentiments d'immersion et d'incarnation sont davantage prégnants que lors d'une expérience interactive classique, renforçant de fait l'intérêt de l'utilisation du *biofeedback*. Ainsi, des études récentes sont centrées sur l'intégration de données physiologiques et d'analyses psychophysiologiques en temps réel pour augmenter l'expérience virtuelle, avec notamment les travaux de Flowers [2018], qui étudie l'appropriation corporelle et la présence *via* l'accès aux données physiologiques. Il propose un système de réalité virtuelle qui donne aux utilisateurs un retour visuel de leur réponse physiologique à divers stimuli environnementaux. Il propose deux expériences : une expérience forçant une perte de contrôle dans l'environnement virtuel (perte de contrôle du mouvement de la caméra) et une expérience où le terrain est modifié en fonction du rythme cardiaque des participants.

10. Flying Mollusk - 2016

11. frozen-bubble.org

Il cherche ainsi à étudier les réactions physiologiques des utilisateurs quand ceux-ci sont soumis à l'illusion d'appropriation corporelle. Comme cela a été montré précédemment, il est possible de tirer parti d'un *biofeedback* passif ou actif, et on retrouve donc ces deux moteurs dans les applications de réalité virtuelle et les travaux qui s'y consacrent.

Certains travaux démontrent qu'un feedback passif peut améliorer l'implication des participants lors d'expériences virtuelles immersives [Argasiński *et al.*, 2018; Dey *et al.*, 2017; Ohmoto *et al.*, 2017]. Ainsi, Ohmoto *et al.* [2017], en créant un jeu compétitif où chaque avatar est doté de trois expressions se produisant en réaction à un événement de jeu et en fonction de l'état physiologique du joueur, montrent que ces expressions ont permis d'induire une forte réponse émotionnelle chez les participants, les affectant de manière inconsciente. Dey *et al.* [2017] ont, d'une certaine façon, étendu ces travaux à l'étude du comportement des utilisateurs dans une situation de collaboration, en partageant leurs données physiologiques (et donc les émotions). Leurs résultats montrent que les participants ressentaient plus d'empathie envers l'autre joueur, étaient plus impliqués et communiquaient plus lorsqu'ils pouvaient voir le rythme cardiaque de leur partenaire de jeu.

D'autres travaux sont consacrés à l'étude de l'utilisation d'un *biofeedback* actif, notamment dans le cadre d'expériences pour l'apprentissage de l'auto-efficacité. Dans une étude récente, Weerdmeester *et al.* [2017] ont examiné le rôle de l'auto-efficacité dans le contexte d'un jeu vidéo (DEEP) augmenté par *biofeedback* respiratoire pour aider les joueurs à gérer leur niveau de stress et d'anxiété. Ils rapportent que plus le sentiment d'auto-efficacité est élevé, plus le niveau d'excitation est faible (en utilisant l'échelle d'auto-efficacité pour les jeunes de Muris [2001]). Si l'absence de groupe témoin tend à limiter les conclusions, les auteurs indiquent que le jeu DEEP aide le joueur à mieux réguler sa réponse émotionnelle. Le *biofeedback* respiratoire a été utilisée dans d'autres travaux, tels ceux de Salminen *et al.* [2018], qui étudient, lors de séances de méditation sociale en réalité virtuelle, les effets d'indices visuels bio-adaptatifs sur l'interdépendance affective. Il s'agit d'une modalité de la présence sociale qui dénote un effet d'interaction affective entre plusieurs utilisateurs. La respiration des participants est représentée sous la forme d'une aura pulsative. Les résultats démontrent que, lorsque le feedback est présent, le sentiment d'interdépendance rapporté est plus élevé, traduisant ici encore l'intérêt du *biofeedback* actif.

L'utilisation de la respiration a également été étudiée comme une mécanique de jeu naturelle en réalité virtuelle. C'est le cas des travaux de Sra *et al.* [2018], qui démontrent son impact significativement positif sur le sentiment de présence, dans leur étude où le contrôle de la respiration permet l'activation de super pouvoirs dans un jeu de tir et un jeu compétitif. Ils

notent par ailleurs que les gamers et les adeptes de la réalité virtuelle préfèrent davantage la version avec *biofeedback*, comparés aux autres participants. Enfin, notons qu'il est nécessaire que cette mécanique soit comprise par les participants pour qu'ils puissent l'exploiter et en tirer bénéfice [Prpa *et al.*, 2018]. Si le sentiment d'agentivité n'est pas perçu, alors l'expérience aura une plus forte propension à être ressentie de manière négative par le joueur.

Ainsi, comme le démontre Weerdmeester *et al.* [2017] et Prpa *et al.* [2018], il existe un effet du sentiment d'auto-efficacité physiologique sur le sentiment d'agentivité en environnement virtuel. De plus, il est intéressant de noter que l'utilisation du *biofeedback* permet aux utilisateurs d'acquérir un meilleur contrôle de leur physiologie, rendant leur locus de contrôle plus interne. Ce dernier ayant une influence sur l'émergence du sentiment d'agentivité, comme l'indiquent Jeunet *et al.* [2018] (voir figure 2.8).

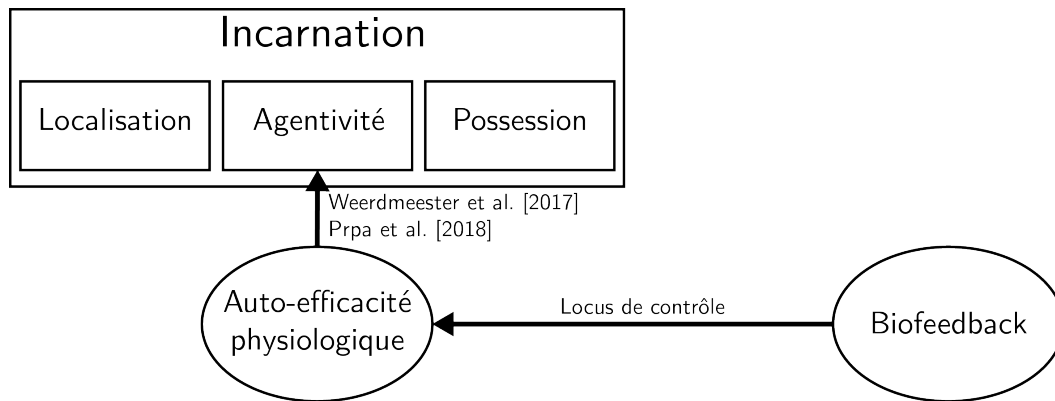


FIGURE 2.8 – Illustration des intrications entre le *biofeedback* et les sentiments d'agentivité et d'auto-efficacité physiologique

Si les travaux présentés précédemment évaluent l'intérêt et l'apport du *biofeedback* en réalité virtuelle, d'autres travaux ont porté sur l'étude des modalités de restitution des données biologiques, car la réalité virtuelle propose un paradigme différent de celui d'une expérience d'interaction homme-machine classique. C'est le cas de Chen *et al.* [2017], qui comparent les effets de différentes modalités de feedback cardiaque : audio (battement cardiaque), visuel (symbole de coeur changeant de taille proportionnellement au changement de rythme cardiaque) et haptique (vibration synchronisées avec le rythme cardiaque). Les résultats sont assez partagés : dans l'ensemble les participants ont rapporté que le feedback visuel était distrayant et que le feedback audio était le plus adapté, même si certains participants plébiscitent la vibration. Plus récemment, Gradl *et al.* [2018] ont également étudié le type de modalité de retour du rythme cardiaque mais se sont concentrés sur l'aspect visuel. Ils proposent quatre systèmes de visualisation du rythme cardiaque : (1) RefVis, un coeur qui pulse à la vitesse de celui de l'utilisateur avec la valeur du rythme cardiaque affichée, (2) ScreenPulse, un cercle

rouge transparent, qui disparaît et apparaît progressivement en fonction du rythme cardiaque, (3) RadialVis, un cercle qui tourne à 360° pendant vingt secondes, pour chaque battement cardiaque une ligne s'affiche depuis le centre du cercle, la couleur et la longueur de la ligne changent en fonction du nombre de battements par minute et (4) CubeGrid, qui est une grille en deux dimensions sur laquelle sont arrangés des cubes, ceux-ci rebondissent jusqu'à trente centimètres en fonction du rythme cardiaque. Les participants sont confrontés à chaque type de visualisation et doivent estimer leur rythme cardiaque puis noter les qualités hédoniques, pragmatiques et l'attractivité de chaque technique. Selon les premiers résultats, la technique ScreenPulse semble être la plus adaptée pour estimer son propre rythme cardiaque, tandis que la méthode CubeGrid est la plus appréciée par les utilisateurs et celle provoquant le plus de réaction. Ces résultats, même s'ils sont propres à l'expérience proposée, seront néanmoins des pistes à envisager lors de la création de nouvelles applications immersives proposant un *biofeedback* actif.

Conclusion

De nombreux travaux ont mis en avant l'intérêt de l'utilisation de données physiologiques pour effectuer du *biofeedback* dans des expériences interactives et de réalité virtuelle (e.g., [Bouvier *et al.*, 2007; Dey *et al.*, 2017]), que ce soit à des fins de divertissement (e.g., [Dekker et Champion, 2007; Nacke *et al.*, 2011]), en ajoutant des mécaniques de jeu originales, ou avec un objectif plus « sérieux », pour permettre aux utilisateurs d'acquérir des compétences dans la gestion de leurs émotions (e.g., [Zafar *et al.*, 2018]). En effet, l'intégration de la physiologie dans des applications interactives semble influencer de nombreuses dimensions de l'expérience utilisateur, telles que le *flow* (e.g., [Schrader *et al.*, 2017]), l'engagement (e.g., [Argasiński *et al.*, 2018]), l'expérience sociale (e.g., [Piumsomboon *et al.*, 2017; Salminen *et al.*, 2018]), l'expérience émotionnelle (e.g., [Bersak, 2001]), la présence (e.g., [Flowers, 2018; Sra *et al.*, 2018]) ou encore l'immersion (e.g., [Kuikkaniemi *et al.*, 2010]). L'utilisation du *biofeedback* comme mécanique indirecte (*i.e.* qui ne change pas fondamentalement l'expérience mais la manière dont elle est perçue) paraît naturelle, plusieurs études évoquées précédemment démontrent qu'un *biofeedback* direct peut positivement impacter l'expérience utilisateur. Nous mettons en lumière ces impacts théoriques, de l'ajout d'un *biofeedback* sur différentes composantes de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif, à travers un modèle que nous nommons « Immersion physiologique » (voir figure 2.9).

Les travaux présentés ont en commun de s'appuyer, pour une large majorité d'entre eux, sur des capteurs physiologiques issus historiquement du domaine médical. Si leur précision est très grande, ils imposent le plus souvent des contraintes d'utilisation importantes, comme des

matériels coûteux, parfois encombrants et des mouvements limités pour les utilisateurs pour assurer la qualité des mesures. Cela cantonne donc d'une part les usages à des applications « de laboratoire » et cela peut limiter d'autant l'illusion de non-médiation, cruciale dans des applications immersives, où le sentiment de présence est le garant d'une expérience réussie [Slater et Steed, 2000].

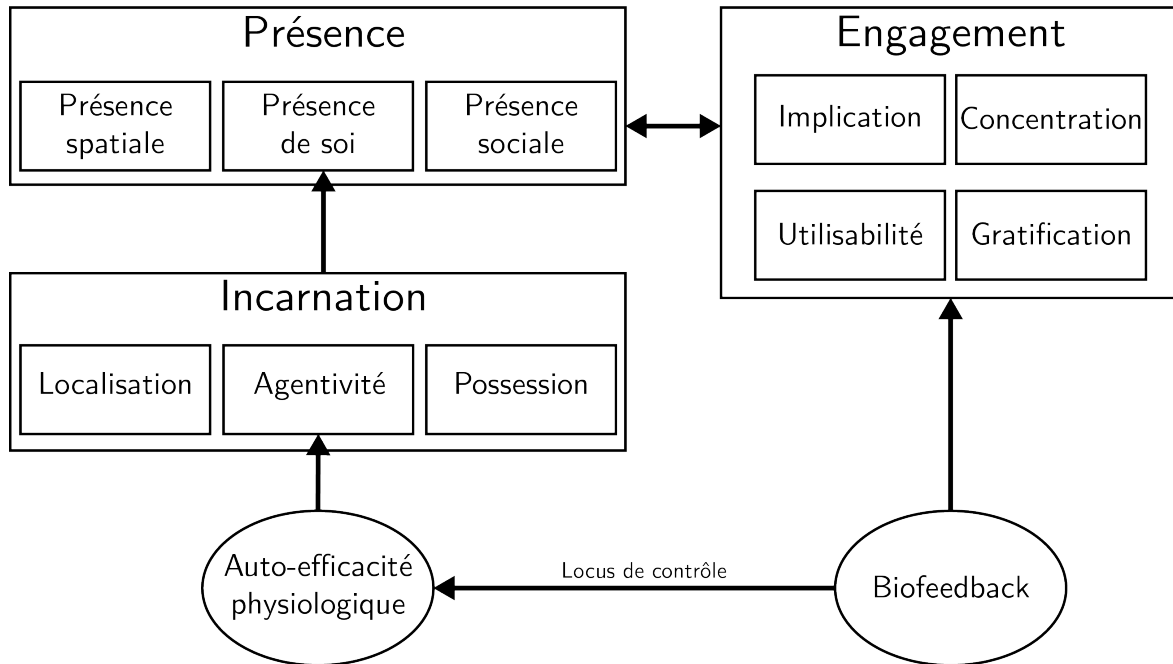


FIGURE 2.9 – Modèle théorique « immersion physiologique »

De fait, très peu de travaux ont été consacrés à l'étude des potentialités du *biofeedback* en lien avec l'utilisation d'objets connectés, qui offrent une grande portabilité et une bonne liberté d'interaction, même s'ils peuvent manquer de précision dans le suivi des données physiologiques. L'arrivée de systèmes de réalité virtuelle abordables, ainsi que leur évolution vers une utilisation mobile, rend l'utilisation des objets connectés prometteuse, tout de moins leur étude digne d'intérêt.

2.3 Les objets connectés comme plateforme mobile de suivi de données physiologiques

L'avènement d'une société tournée vers le bien être et la santé entraîne une forte progression de la vente d'outils de suivi de l'activité physique. Dans un rapport, le cabinet Juniper Research [2013] prédit ainsi que les ventes d'appareils connectés de *fitness* s'élèveront à environ 110 millions en 2018. Cette croissance se retrouve dans le domaine de la santé du quotidien, Piwek *et al.* [2016] prédisent que les outils connectés devraient prendre une part importante dans la relation entre un patient et son praticien, si des techniques de formation des utilisateurs et de validation des données sont mises en place dans une avenir proche.

Il est important de différencier les objets connectés qui augmentent l'environnement (l'environnement intelligent [Weiser *et al.*, 1999]) de ceux portés par l'utilisateur (habitroniques ou *wearables*), qui forment ce qui est appelé le *Body Sensor Network*. Le concept de *Body Sensor Network*, défini par Ali *et al.* [2013], a pour origine le concept de *Wireless Personal Area Network*, caractérisé dans les années 90. On considère donc un « réseau », qui se déplace avec l'utilisateur, ses données vitales étant surveillées par les objets connectés. Dans la suite de notre travail de thèse, nous étudions les *wearables* (objets connectés portés). Ceux-ci fournissent deux types de données (voir la figure 2.10) :

- Des données physiologiques.
- Des données provenant de centrales inertielles (présentes dans la majorité des *wearables*).

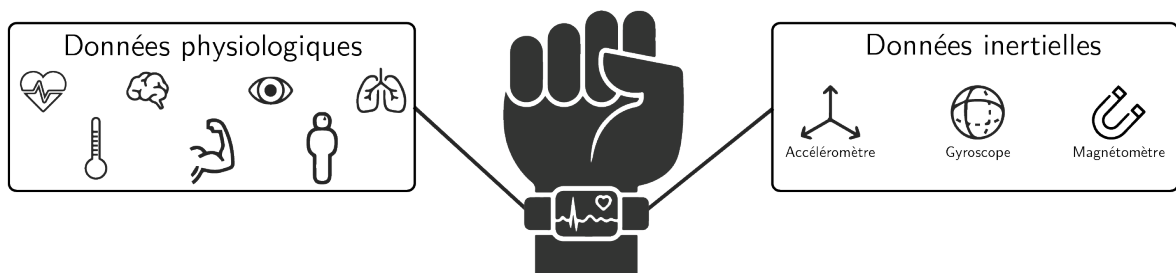


FIGURE 2.10 – Schématisation du potentiel de captation des *wearables*.

Dans la partie suivante, nous allons évoquer les travaux permettant d'attester la possibilité d'utiliser ces objets connectés portés dans le cadre de travaux centrés sur la captation et l'interprétation de données physiologiques.

Robustesse et utilisabilité des objets connectés

Comme nous l'avons évoqué précédemment, dans le cadre d'études scientifiques, les capteurs physiologiques classiques (d'origine médicale) sont les plus souvent utilisés. Gaskin *et al.* [2017] identifient quatre facteurs limitant de ces outils : (1) le coût élevé, (2) la taille de l'échantillon des études avec captation physiologique classique (à cause du prix, de l'encombrement et de la logistique), (3) l'invasivité, (4) la difficulté à faire correspondre les traits psychologiques et les relevés physiologiques. Ils démontrent, en utilisant le bracelet connecté Microsoft Band 2¹² pour mesurer des réactions physiologiques à des stimuli en immersion 360° avec le casque Samsung Gear VR, qu'il est possible d'utiliser des *wearables* grand public pour l'enregistrement de données physiologiques dans le cadre de travaux scientifiques. La qualité des relevés physiologiques est jugée suffisante. L'apport de ces capteurs portables et connectés (dont la précision s'accroît à chaque nouvelle mise sur le marché, en matière de mobilité, de niveau d'intrusivité et de coût) est aussi appuyé par les études menées par Pantelopoulos et Bourbakis [2008], Patel *et al.* [2012], Mukhopadhyay [2015] ou encore Hänsel *et al.* [2018].

Certaines études se sont, focalisées de manière plus approfondie sur la qualité de la captation. Une équipe de médecins et de chercheurs a ainsi démontré, en mesurant la fiabilité des données fournies par un bracelet connecté, que ces capteurs sont suffisamment précis pour être utilisés dans le cadre d'applications sportives ou de divertissement [Wang *et al.*, 2017]. Reinerman-Jones *et al.* [2017] ont également souligné l'intérêt d'utiliser le bracelet Microsoft Band 2 pour la recherche scientifique, en estimant qu'il manque toutefois de précision, par comparaison au système *Infiniti ProComp*¹³, approprié à la mesure médicale. La multitude d'appareils sur le marché rend difficile l'énoncé d'une conclusion définitive sur la possibilité ou non d'utiliser du matériel grand public dans la cadre d'études scientifiques ayant recours à la mesure de données physiologiques. Cela est d'autant plus complexe que, dans le cadre du rythme cardiaque par exemple, différentes technologies cohabitent. Dans le but de déterminer une adéquation entre technologie de mesure et usage projeté, des travaux ont porté sur la comparaison de trois technologies de mesures du rythme cardiaque (bracelet connecté avec photopléthysmographie (PPG), ceinture thoracique avec électrocardiographie (ECG) et des électrodes médicales pour l'ECG) dans différents types de situations (immobile, en mouvement, lors d'une activité physique et lors d'une activité stressante) [Hänsel *et al.*, 2018]. Au terme de leur étude, ils concluent que la précision des données relevées par les outils PPG est inférieure à celle des ECG (ceinture thoracique et matériel médical), particulièrement lors

12. <https://www.microsoft.com/en-us/band>

13. <http://thoughttechnology.com/index.php/procomp-infiniti-325.html>

de situations impliquant une activité physique. Ils n'ont pas observé de différences entre les bracelets connectés et le système placé sur le torse, quant à la détection du stress. Enfin, ils fournissent un espace d'évaluation des différents types d'outils, conditionnant le choix d'une technologie à l'expérience proposée (voir figure 2.11).

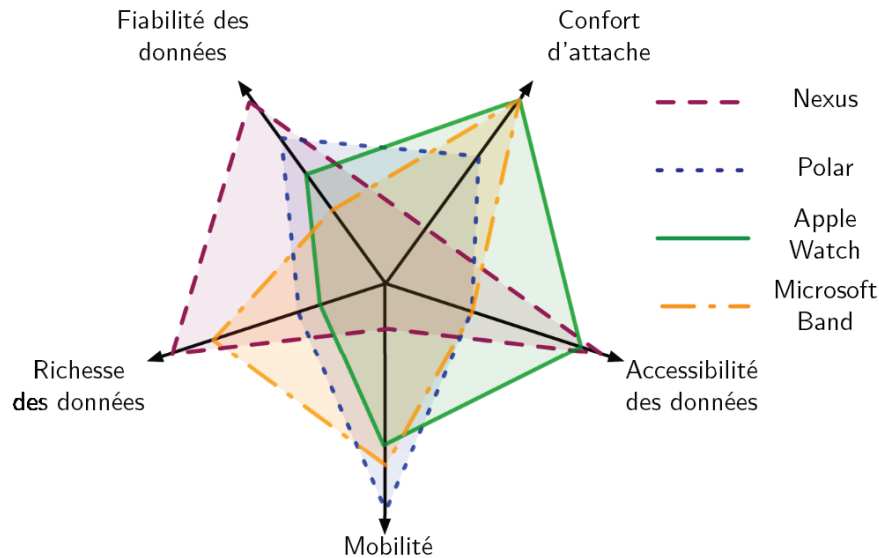


FIGURE 2.11 – Espace de design des objets connectés proposé par Hänsel *et al.* [2018] (traduction libre). Il compare le kit de mesure scientifique Nexus 10 (<https://www.mindmedia.com>), la ceinture pectorale de captation cardiaque Polar H7 (www.polar.com) et les montres connectées Apple Watch (www.apple.com/watch) et Microsoft Band 2.

Cas d'application des objets connectés

Au-delà des études mesurant la précision absolue des *wearables* comparativement aux capteurs médicaux, certains travaux ont porté sur leur évaluation dans des cas d'application concrets afin de voir s'ils pouvaient être jugés « suffisants », notamment pour la détection d'émotions. Züger et Fritz [2015] ont ainsi démontré l'intérêt de l'utilisation des *wearables* en situation réelle pour déterminer l'état psychophysologique d'ingénieurs et ainsi prédire s'il était possible de les déranger durant leur travail sans interrompre une phase de concentration. He *et al.* [2016] proposent et évaluent un système de détection de l'émotion basé sur un algorithme de traitement des signaux physiologiques (activité cardiaque et respiratoire) captés par des *wearables*. Ils démontrent la pertinence et la robustesse de la détection physiologique d'émotions d'un système portable dans le cadre de leur étude. Myroniv *et al.* [2017] obtiennent également des résultats satisfaisants en matière de détection d'émotions avec un système basé sur l'apprentissage automatique et la captation physiologique *via* des objets connectés portés.

La portabilité de ces outils et leur usage, qui tend à devenir courant, permet aussi d'ima-

giner des usages non plus limités à un individu mais s'adressant à des groupes ou des entités sociales. C'est le coeur des travaux de Rincon *et al.* [2017], qui présentent un système permettant d'aider des agents intelligents à la prise de décision à partir d'un bracelet connecté, non-invasif, récupérant l'activité cardiaque ainsi que la conductance cutanée pour de la détection d'états émotionnels. L'application qu'ils proposent permet l'extraction de l'état émotionnel d'un groupe de personnes. Ils ont par la suite développé un bracelet intelligent (conductance cutanée et photoplethysmographie) permettant la captation, l'analyse, la représentation et la gestion de l'émotion sociale dans un système multi-agents [Rincon *et al.*, 2018], montrant l'intérêt et la demande de ce type de matériel.

Dans un cadre plus pragmatique exploitant les capacités de mesure physiologique des objets connectés, les travaux de Miranda *et al.* [2018], portant sur le développement de *Bindi*, un système multimodal permettant de détecter l'état psychologique d'une personne en cas d'agression sexuelle, sont prometteurs. Ils présentent ainsi un prototype finalisé de leur produit composé d'un bracelet connecté, mesurant la conductance et la température cutanées ainsi que l'activité cardiaque, d'un pendentif enregistrant le son et d'une application sur smartphone. Si les tests *in situ* sont complexes à mener, les résultats obtenus en laboratoire semblent positifs. Enfin, ils définissent aussi le concept d'Internet des Objets Affectif (*Affective Internet of Things (AIoT)*), qui représente les outils et techniques qui permettent de fournir le meilleur de l'expérience utilisateur dans un monde inter-connecté, en détectant ou prédisant les états émotionnels d'une personne.

Ces applications concrètes des objets connectés, dont l'intérêt est indéniable et dont la faisabilité technique semble être en passe d'être démontrée aujourd'hui, laisse naturellement entrevoir un usage pour lequel nous avons évoqué la pertinence de l'intégration des données physiologiques, celui des applications virtuelles immersives.



FIGURE 2.12 – Exemples de *wearables*. Le bracelet de captation cardiaque Mio LINK ©Mio Global 2015 (2.12a). Les chaussures de course connectées UA HOVR™ *Phantom Connected* ©Under Armor 2018 (2.12b). Le tee-shirt de captation biométrique pour le sport *Athos Shirt* ©Mad Apparel, Inc 2018.

Objets connectés pour les applications virtuelles immersives

Si le fort potentiel et l'utilisabilité des *wearables* semblent les qualifier pour être directement intégrés dans le cadre d'expériences virtuelles immersives, Siriborvornratanakul [2016] montre que très peu d'études sont basées sur la combinaison réalité virtuelle et objets connectés. Muñoz *et al.* [2016b] ont développé un premier framework pour la réalité virtuelle mobile, facilitant l'intégration de données physiologiques fournies par des *wearables* Android (pour le rythme cardiaque), Myo (pour l'électromyographie) et Muse (pour l'électroencéphalographie). Ils ont testé ce framework en proposant EmoCat, un jeu dans lequel le joueur doit réguler son rythme cardiaque pour essayer de trouver un chat perdu en forêt. Ce cas d'usage leur a permis de démontrer l'utilisabilité de leur système. De plus, ils indiquent que leur jeu a permis d'induire un sentiment de calme chez les utilisateurs grâce à l'utilisation de techniques de respiration pour la réduction du rythme cardiaque. Il s'agit de l'une des premières études menées sur ce sujet ; elle a ouvert la voie à de nouvelles perspectives quant à la combinaison de la réalité virtuelle et des objets connectés. A la suite de ces travaux, Muñoz *et al.* [2017] ont présenté le « *Biocybernetic Loop Engine* », un moteur de jeu permettant de connecter différents appareils de mesure physiologique, de traiter leurs données et d'intégrer ces dernières dans une boucle de *biofeedback*. Si la portée de ces travaux se limite à une preuve de concept, ils démontre la faisabilité de l'intégration de leur système pour créer des exergames adaptatifs grâce à la captation physiologique. Dernièrement, Marín-Morales *et al.* [2018] ont mené une étude visant d'une part à évaluer la capacité des environnements virtuels à induire les mêmes émotions que la réalité et d'autre part à mesurer la qualité de l'identification des émotions *via* l'analyse de signaux physiologiques. Ils ont pour cela utilisé des capteurs portables pour mesurer l'activité cardiaque et cérébrale. Ils ont mis en place quatre situations d'induction d'émotion : des images sur un écran, un panorama à 360° *via* un casque, un environnement immersif 3D scénarisé et une situation réelle physique. Les résultats positifs qu'ils obtiennent rendent plausible l'utilisation de *wearables* dans des expériences de réalité virtuelle. En effet, leur modèle d'identification des émotions (basé sur un apprentissage automatique pour extraire les composantes principales) s'est montré relativement performant, avec une précision de l'ordre des 70% dans la détection de la bonne émotion. De plus, les environnements virtuels qu'ils ont proposés ont permis d'induire les émotions (sous la forme d'une combinaison valence-stimulation) attendues.

L'intégration des *wearables* dans des expériences de réalité virtuelle permet « in fine » de « transposer » davantage l'utilisateur dans l'environnement virtuel immersif. Son avatar, physique, devient ainsi physiologiquement synchronisé. En ce sens, et aidés par l'avènement

des *wearables*, Datta et Coughlin [2016] définissent le concept de « sens digitaux » avec la mise en place d'une architecture d'objets connectés. La génération de stimuli *via* des capteurs capables de capturer et reproduire des images, du son, des odeurs ou encore des sensations haptiques, couplée aux technologies immersives, permettrait de pousser l'immersion et l'interaction à son paroxysme, tout en se basant sur des outils grand public et financièrement abordables. L'écosystème des objets connectés devient « vivant. »

2.4 Résumé de l'état de l'art

Afin de produire une synthèse de notre revue de l'état de l'art réalisée dans le cadre de cette thèse de doctorat, nous allons identifier les liens permettant de comprendre les différents apports de l'ajout d'un *biofeedback* via des *wearables* dans des expériences virtuelles immersives.

Les travaux réalisés au cours de cette thèse sont dédiés à l'étude de l'expérience utilisateur en réalité virtuelle. Dans un premier temps, nous avons cherché à comprendre quels en étaient les facteurs d'influence et comment moduler ceux-ci pour fournir une expérience optimale. Ainsi, nous avons mis en lumière l'importance du sentiment de présence, de l'immersion, de l'engagement, de l'agentivité, des émotions et souligné leur forte intrication. Nous avons ensuite mis en relation ces différents facteurs avec l'utilisation des données physiologiques, notamment le rythme cardiaque, pour en expliquer les mécaniques sous-jacentes et leurs potentialités.

La première partie de l'analyse de la littérature sur l'expérience utilisateur en réalité virtuelle nous a permis d'identifier un lien fort entre le sentiment de présence et les émotions. En effet, les contributions des travaux que nous avons analysés résident dans la capacité des environnements virtuels immersifs à induire des émotions en temps réel. Une expérience émotionnelle forte permet d'induire un fort sentiment de présence, cela entraîne de fait un effet positif sur le niveau d'engagement de l'utilisateur. En effet, Lessiter *et al.* [2001] définissent la présence comme multimodale, composée de nombreux facteurs, chacun étant un levier potentiel pour la modifier. Ils développent un modèle explicatif comprenant quatre facteurs : espace physique, engagement, naturalité et un quatrième facteur atténuant le sentiment de présence : les effets négatifs. Ainsi, s'il est possible de moduler le niveau de présence en modulant le niveau d'émotions et par conséquent le niveau d'engagement, alors il est possible de rendre l'utilisateur plus investi dans l'expérience qu'il est en train de vivre. Cependant, il est important de garder une maîtrise de la charge émotionnelle pour ne pas rebuter l'utilisateur en surchargeant l'expérience car si un fort niveau d'engagement garantit le succès d'une expérience, le spectre de l'engagement optimal est limité. Nous avons vu que l'une des solutions possibles pour créer et maintenir l'état de *flow* serait d'induire des émotions en temps réel en fonction de données traduisant l'état psychophysiologique de l'utilisateur, et ainsi d'adapter les schémas d'induction d'émotions à son profil et ses objectifs. Ainsi, l'adéquation entre le profil émotionnel des utilisateurs, le niveau d'activation de leur système nerveux autonome (SNA) et l'adaptabilité d'un environnement virtuel a fait l'objet de travaux [Bouvier

et al., 2007; Geslin, 2013]. Dans le domaine du jeu vidéo, des travaux ont par ailleurs démontré que les données physiologiques pouvaient être exploitées pour augmenter l'expérience de jeu [Li *et al.*, 2015; Mirza-Babaei *et al.*, 2011], en particulier les laboratoires des studios VALVe [Ambinder, 2011]. L'utilisation du *biofeedback* peut ainsi permettre de produire de nouvelles mécaniques de jeu [Dekker et Champion, 2007; Gilleade *et al.*, 2005; Nacke *et al.*, 2011], en changeant par exemple la vitesse de l'avatar en fonction du rythme respiratoire, ou la météo de l'environnement virtuel. Les résultats des études menées dans ces travaux démontrent que les participants ont apprécié les versions physiologiquement augmentées des jeux, reconnaissant que le *biofeedback* peut améliorer l'engagement et l'expérience utilisateur, ici considérée comme une mécanique passive.

Nous avons ensuite montré qu'au-delà d'un *biofeedback* indirect, il était également possible d'utiliser le contrôle volontaire de l'activité physiologique, ce qui nous a permis d'évoquer le concept d'auto-efficacité. En effet, Bandura [1982] explique que les capacités d'autorégulation physiologique nécessitent des outils dérivant de l'agentivité personnelle, tandis que Sharek [2012] explique que l'engagement réside dans un large spectre de dimensions affectives et cognitives ou d'états tels que la motivation et l'auto-efficacité. Et si l'engagement est une composante majeure de l'expérience utilisateur, l'agentivité est aussi nécessaire au sentiment d'immersion, ces deux notions se retrouvant dans le concept d'auto-efficacité. Il a donc été montré qu'il est possible de contrôler volontairement ses réponses physiologiques et notamment son rythme cardiaque [Clynes, 1960; Sroufe, 1971; Westcott et Huttenlocher, 1961], rendant possible d'envisager une boucle de *biofeedback* active, *via* le rythme cardiaque. Les réponses physiologiques ne seraient plus des mécaniques passives de l'expérience, l'utilisateur deviendrait alors un acteur de son activité physiologique en prenant volontairement le contrôle. Le sentiment d'auto-efficacité est aussi améliorée par l'utilisation de la réalité virtuelle, le sentiment d'immersion aidant à une meilleure concentration et un meilleur contrôle [Prpa *et al.*, 2018; Weerdmeester *et al.*, 2017]. Ainsi, en introduisant le contrôle volontaire de l'état physiologique comme une mécanique d'interaction, il serait possible d'augmenter non seulement le niveau d'engagement mais aussi le sentiment d'agentivité, tout deux cruciaux pour une expérience virtuelle immersive réussie.

D'un point de vue théorique, les implications sur l'expérience utilisateur d'un contrôle volontaire de la physiologie sont donc importantes. Puisque l'auto-efficacité est liée au sentiment d'agentivité, cela suggère que le sentiment de contrôle sur son propre état psychophysiologique pourrait conduire à un plus fort sentiment d'incarnation, si ce contrôle se reflétait dans l'environnement virtuel. Ce sont les travaux de Kilteni *et al.* [2012] qui ont établi ce lien

entre incarnation et agentivité, la seconde étant une des trois dimensions constitutives de la première, aux côtés du sentiment d'auto-localisation et du sentiment d'appropriation. Ce modèle de l'incarnation est en accord avec les travaux de Biocca [1997], qui a exploré la relation entre l'incarnation et la présence en environnement virtuel immersif et a présenté des éléments suggérant que le sentiment d'agentivité est crucial pour atteindre un sentiment de présence dans des environnements virtuels immersifs sous casque.

Notons enfin que, par l'intégration d'un *biofeedback*, il est possible d'augmenter le sentiment d'auto-efficacité physiologique, et donc de changer le locus de contrôle d'un utilisateur, lui permettant d'atteindre un plus fort sentiment d'agentivité, d'immersion [Jeunet *et al.*, 2018] et de présence [Groenegrass *et al.*, 2010; Murray *et al.*, 2007].

À partir des études sur l'expérience utilisateur, l'auto-efficacité et la présence en réalité virtuelle, nous avons établi qu'il existe une forte intrication entre ces différents facteurs. Ainsi, nous avons pour objectif de comprendre les impacts du *biofeedback* sur ceux-ci. Notre état de l'art a permis de montrer qu'une boucle de *biofeedback* serait à même d'augmenter une expérience virtuelle immersive pour la rendre pleinement engageante et augmenter significativement le sentiment de présence et d'immersion. Néanmoins, la réalité des contraintes matérielles des outils de mesure physiologique limite leur démocratisation. Dans l'idée de contourner cette contrainte, nous nous sommes orientés sur l'étude de l'utilisation des objets connectés, en pleine expansion technologique et commerciale. Nous avons pu observer dans notre revue de littérature qu'ils semblent se placer comme des supports de choix pour intégrer pleinement la captation physiologique aux expériences de réalité virtuelle.

2.5 Hypothèses et déroulement des travaux

Si la réalité virtuelle semble parvenir à un niveau de maturité technologique permettant d'entrevoir une adoption de masse, cette dernière n'est pour autant pas encore acquise. Le développement de la réalité virtuelle adaptée à la mobilité (grâce notamment à *Oculus*[®] et *Samsung*[®]), permettra probablement d'accélérer cette démocratisation. Cependant, pour être vraiment attractive, utilisable et utile, l'expérience immersive nécessite d'être associée à des méthodes d'interaction pertinentes et des plateformes abordables. Ainsi, nos travaux s'intéressent à l'utilisation des objets connectés portés comme moyens d'ajouter de l'interaction et d'améliorer l'expérience utilisateur dans les environnements virtuels immersifs (EVI). Nous relevons également que la majorité des études que nous avons présentées sont effectuées dans un cadre expérimental. Souhaitant proposer des solutions directement applicables dans des cas pratiques les expérimentations que nous proposons prennent ainsi la forme d'expériences vidéo-ludiques se voulant plus proche de situations écologiques (cet aspect sera développé dans le chapitre 3).

L'état de l'art nous a permis de mettre en exergue un lien entre présence et émotions. Nous avons relevé que l'ajout d'un *biofeedback* lié à l'état psychophysiologique d'un utilisateur provoquait une hausse des sentiments d'engagement et de présence dans des applications interactives. Si les environnements virtuels peuvent être de très forts vecteurs d'émotions, l'ajout d'un *biofeedback* liée à ces émotions devrait permettre d'améliorer d'autant plus l'expérience utilisateur dans son ensemble. Nous relevons également que la majeure partie des outils de captation physiologique, disponibles sur le marché des *wearables*, est tournée vers le suivi du rythme cardiaque. Nous choisissons donc de nous tourner vers ce type de capteur dans le cadre de ces travaux. Ainsi, nous émettons l'hypothèse suivante :

H.1 : *L'utilisation d'une boucle de biofeedback cardiaque, via un bracelet connecté grand public, permet d'améliorer l'expérience utilisateur dans un environnement virtuel immersif.*

Afin de valider cette hypothèse, nous avons mis en place une étude empirique nous permettant d'évaluer l'expérience utilisateur dans différents contextes au sein d'un EVI. Cette étude se concentre sur l'introduction d'un *biofeedback* passif et la validation de l'outil de captation choisi. Elle oppose deux conditions liées au *biofeedback*, sa présence et son absence. La comparaison des retours d'expérience utilisateur entre ces deux versions nous permet d'observer les éventuelles différences entre les deux conditions et donc l'impact du *biofeedback*.

S'il a été démontré qu'il était possible d'avoir une forme de contrôle volontaire de son propre rythme cardiaque et que cela pouvait générer en retour de l'engagement et un certain niveau d'agentivité, très peu d'études ont été réalisées pour évaluer l'impact d'une telle mécanique dans le cadre d'une expérience de réalité virtuelle. Ainsi, sur la base des travaux sur l'auto-efficacité et l'agentivité en réalité virtuelle, nous souhaitons étudier les effets d'une mécanique d'interaction rendant obligatoire le contrôle cardiaque en EVI. Ainsi dans le cadre d'une validation des impacts positifs de la boucle de rétroaction (hypothèse H.1) et, en nous appuyant sur notre revue de littérature, nous nous proposons d'éprouver l'hypothèse suivante :

H.2 : *Le contrôle volontaire du rythme cardiaque peut être utilisé comme une mécanique d'interaction engageante et porteuse d'un fort sentiment d'agentivité en environnement virtuel immersif.*

Cette hypothèse est investiguée par la mise en place d'une étude en deux parties. La première a pour objectif de mesurer la capacité d'un groupe de participants à contrôler volontairement leur rythme cardiaque. La seconde partie plonge ces participants dans une expérience virtuelle immersive où il est nécessaire de contrôler son rythme cardiaque pour achever les tâches proposées. Durant cette seconde étude, nous opposons les participants par rapport à leur niveau de compétences et les soumettons aux deux niveaux de difficulté proposés par l'expérience. Ainsi, grâce à ces modalités, il est possible d'étudier les impacts de la boucle de rétroaction sur l'expérience utilisateur et l'agentivité. De plus, les résultats de cette expérimentation en matière d'expérience utilisateur seront à même d'apporter des éléments supplémentaires pour éprouver l'hypothèse H.1.

Enfin, notre revue de littérature sur l'expérience utilisateur et la physiologie en réalité virtuelle nous permet d'esquisser un modèle théorique de ce que nous nommons « immersion physiologique » (voir la figure 2.9). Si les résultats de nos travaux ne nous permettront de valider ce modèle dans son intégralité, les réponses apportées par nos deux études permettront d'approfondir nos propositions théoriques et d'ouvrir de nouvelles investigations sur l'utilisation de la physiologie en réalité virtuelle. Ainsi, l'observation des liens entre l'agentivité physiologique et la qualité de l'expérience utilisateur rapportée nous permet de poursuivre des études empiriques autour de ce modèle, que nous formulons *via* l'hypothèse suivante :

H.3 : *Il existe une forme d'immersion physiologique, une relation positive entre l'intégration de la physiologie dans une expérience virtuelle immersive et le niveau d'immersion, influençant aussi la présence et l'engagement de l'utilisateur.*

La discussion de la validité de nos hypothèses nous permettra ainsi de répondre à l'objectif général de cette thèse qui est d'offrir une meilleure compréhension des effets sur l'expérience utilisateur de l'intégration d'un *biofeedback* abordable dans des environnements virtuels immersifs.

Chapitre 3

Méthodologie

Sommaire

3.1	Études empiriques	60
3.2	Typologies des méthodes	61
3.2.1	Méthodes quantitatives	61
3.2.2	Méthodes qualitatives	65

3.1 Études empiriques

Nous avons décidé de baser nos travaux de thèse sur des évaluations empiriques pour valider nos hypothèses et éprouver les systèmes que nous proposons. Dans le cadre de nos travaux, nous avons choisi de proposer nos expérimentations sous forme de jeux vidéo en réalité virtuelle. Si, dans la recherche scientifique, notamment dans le domaine de l'interaction homme-machine, des expérimentations plus proches de conditions de laboratoire sont préconisées, de plus en plus d'études utilisent des jeux vidéo comme des outils de recherche. C'est ainsi que Levy *et al.* [2018] réalisent une étude de l'utilisation des jeux vidéo comme outils scientifique de collecte de données pour des domaines de recherche tels que la psychologie ou les interactions homme-machine. Ils indiquent que cet intérêt naît en partie de la capacité de rejouabilité des jeux et leur propension à engager le participant dans la tâche qu'il effectue. Il est important pour nous de fournir des expériences générant de l'engagement, cette notion étant centrale à nos travaux afin de comprendre les effets du *biofeedback* sur celle-ci. Levy *et al.* notent que si un jeu peut être un outil scientifique fiable, le *gameplay* ne doit pas prendre le pas sur la démarche scientifique. Il est nécessaire de trouver un compromis dans la réduction de l'expérience vidéo-ludique au profit de l'utilité scientifique, sans pour autant rendre le jeu ennuyeux, ce qui plaide pour le développement d'un jeu *ad hoc* plutôt que l'utilisation d'un jeu existant.

Ainsi dans notre première expérimentation, nous évaluons l'effet de l'utilisation du *biofeedback* passive (sur une situation de jeu), en comparant les conditions d'utilisation et de non-utilisation. Pour pouvoir en mesurer les impacts, il est crucial que cette différence soit la seule présente lors de l'expérience de notre environnement virtuel. Les résultats de cette étude, permettant l'évaluation de la capacité des utilisateurs à prendre en main une telle mécanique, nous permettent aussi de définir les contours et limites de la seconde expérimentation. En effet, celle-ci propose un *biofeedback* volontaire obligatoire comme une mécanique d'interaction directe. Ce caractère obligatoire rendant de fait impossible de considérer une modalité de l'expérience ne contenant pas de *biofeedback*, nous évaluons deux versions du même jeu, chacune possédant un niveau de difficulté différent. Les échantillons de participants sont construits sur la base de leur niveau de compétence dans le contrôle volontaire de leur activité cardiaque. Ainsi nous sommes en mesure d'évaluer les effets de l'ajout de cette mécanique d'interaction au travers des dimensions orthogonales du niveau de difficulté du jeu et du niveau de maîtrise des participants à contrôler leur rythme cardiaque.

3.2 Typologies des méthodes

Si notre revue de littérature nous a montré qu'il existait de nombreuses définitions de l'expérience utilisateur et des facteurs qui la composent, toutes s'accordent pour affirmer que celle-ci est évaluable. Les méthodes objectives de l'analyse de l'expérience utilisateur se basent sur des analyses physiologiques et comportementales des participants pour déterminer des états non soumis à la perception directe de ceux-ci. Si ces données sont basées sur des mesures physiques et donc jugées plus fiables pour la réalisation de tests, elles prennent difficilement en compte la perception de l'utilisateur, élément pourtant central dans le vécu d'une expérience. Dans le cadre de nos travaux basés sur la captation physiologique, il semblerait donc logique d'exploiter ces données pour tenter d'objectiver l'expérience utilisateur. Il faut cependant mettre cette idée en rapport avec notre objectif d'étudier l'utilisation du *biofeedback* comme une mécanique d'interaction. Ainsi, ces modifications conscientes et volontaires de l'état physiologique des participants ne nous permettent pas d'envisager l'utilisation de données physiologiques pour mesurer physiquement l'expérience utilisateur. Comme mentionné dans l'état de l'art, une modification volontaire du rythme cardiaque aurait une influence sur ces autres signaux. Ces considérations expliquent le choix de nous concentrer sur l'utilisation de méthodes subjectives dans le cadre de notre mesure de l'engagement et de l'agentivité. Dans le cadre d'applications interactives, de nombreuses méthodes et techniques subjectives ont ainsi été proposées pour mesurer les différentes composantes de l'expérience utilisateur. Une première partie se base sur des démarches quantitatives. Des méthodes générant des données numériques ou des informations qui peuvent être converties en chiffres, permettant une analyse statistique. La seconde partie concerne les démarches qualitatives, qui mettent l'accent sur la collecte de données principalement verbales. Dans les parties suivantes, nous allons présenter et justifier les différentes méthodes considérées dans notre étude.

3.2.1 Méthodes quantitatives

Par définition, l'expérience utilisateur comporte une majorité de facteurs subjectifs, deux utilisateurs n'ayant pas forcément le même ressenti lors d'une même tâche, en raison des différences interpersonnelles. Ainsi, l'utilisation d'échelles de Likert¹ [Likert, 1932] ou d'échelles bipolaires sémantiques² [Osgood, 1962] soumises à deux utilisateurs à la suite de la même

1. Une échelle de Likert est un outil psychométrique permettant de mesurer une attitude chez des individus. Elle tire son nom du psychologue américain Rensis Likert qui l'a développée. Elle consiste en une ou plusieurs affirmations (énoncés ou items) pour lesquelles la personne interrogée exprime son degré d'accord ou de désaccord.

2. Dans une échelle bipolaire, contrairement à une échelle de Likert, les pôles peuvent représenter autre chose que le niveau d'approbation, comme l'évaluation d'un état émotionnel.

expérience pourra retourner des résultats différents. Il est alors communément admis que plus l'échantillon est grand et plus la fiabilité de ces outils dans la représentation d'un retour d'expérience augmentera. Ces outils sont très prisés dans les études visant à analyser et à modéliser l'expérience utilisateur. Dans la suite de cette partie, nous allons présenter les différents questionnaires mis en place pour nos expérimentations, en fonction des facteurs mesurés.

Confort d'utilisation et robustesse

Il est généralement admis que le port d'un bracelet connecté n'est pas gênant pour une personne, ce type d'accessoire étant courant dans le quotidien, car présentant les mêmes contraintes que le port d'un bracelet-montre. Les systèmes de réalité virtuelle sont, quant à eux, souvent encombrants, et limitent la liberté de mouvement en raison de liaisons filaires. Il demeure donc important d'interroger l'utilisateur sur son confort au regard de l'intégration, et donc du port, de matériels supplémentaires dans le cadre d'un système de réalité virtuelle. Ainsi, nous avons mis en place des questions simples, sous la forme d'échelles de sémantiques différentielles, qui nous permettront d'établir le niveau de gêne éventuellement induite par la présence du bracelet lors de l'expérience virtuelle.

Notre analyse de la littérature nous a permis de vérifier que les capteurs connectés offraient une qualité de captation suffisante pour être utilisés dans le cadre d'applications de divertissement ou de sport. L'étude de Wang *et al.* [2017] a notamment conditionné le choix d'utiliser un bracelet de la marque Mio[®] dans nos expériences, ce produit ayant été validé par leurs résultats. Ainsi, notre objectif n'est pas de valider la précision de notre capteur. Pour évaluer la robustesse de ce capteur dans les applications de réalité virtuelle impliquant du mouvement, nous avons choisi de relever le nombre de déconnexion et de consigner les valeurs aberrantes du rythme cardiaque par le biais d'un enregistrement continu au cours des différentes passations.

Niveau d'engagement

L'état de l'art a permis de souligner que l'engagement utilisateur est une notion qui a fait l'objet de nombreuses études. Plusieurs modèles ont été développés pour essayer de le définir et de le caractériser et ont permis de concevoir des questionnaires visant à le mesurer. Après analyse, nous avons sélectionné les différents facteurs nous paraissant les plus pertinents dans le cadre de nos travaux (voir le tableau 3.1). Nous avons fait le choix d'inclure certains questionnaire se rapportant au monde du jeu vidéo, nos expérimentations prenant la forme

de jeux en réalité virtuelle, il nous est apparu important de considérer ces modèles. Voici la liste des questionnaires analysés portant en partie sur l'engagement :

- Le *Presence Questionnaire* (PQ) [Witmer et Singer, 1998] : ce questionnaire est construit pour évaluer le sentiment de présence en environnement virtuel, mais il agrège pourtant plusieurs notions constitutives de l'expérience utilisateur. En effet, il présente des items faisant référence à des notions de présence physique, d'immersion et d'engagement. Ce pour quoi il a été critiqué par la communauté scientifique de la réalité virtuelle [Slater, 1999]. Il comporte toutefois des items qui nous paraissent intéressants concernant l'engagement lié à l'interaction.
- *L'AttrakDiff* [Hassenzahl *et al.*, 2003] : ce questionnaire est basé sur un modèle théorique de l'attractivité d'une activité interactive, fondé sur le fait qu'une expérience optimale (influençant les émotions et générant un état de *flow*) est jugée en fonction de ses caractéristiques hédoniques et pragmatiques. Ainsi, ils proposent une échelle séparée en quatre dimensions essentielles : (1) la qualité du produit espérée par le designer, (2) la perception subjective de la qualité et son évaluation, (3) les qualités pragmatiques et hédoniques indépendantes et (4) les conséquences comportementales et émotionnelles. Ce questionnaire a fait l'objet d'études ultérieures par ses auteurs, et en 2010 Hassenzahl *et al.* précisent leur modèle en liant leur définition de l'attractivité et de l'engagement, ce dernier étant lui aussi divisé en deux points : pragmatique (utilité et utilisabilité du système) et hédonique (motivation, stimulation et challenge pour l'utilisateur).
- Le *Game Engagement Questionnaire* (GEQ) [Brockmyer *et al.*, 2009] : ce questionnaire permet de mesurer le niveau d'engagement utilisateur lors d'une expérience vidéoludique. Dans ce questionnaire ils considèrent l'engagement comme un indicateur générique du niveau d'implication en jeu. Ils présentent ainsi, quatre facteurs de l'engagement : (1) la présence, (2) le *flow*, (3) l'absorption et (4) la dissociation.
- *L'User Engagement Scale* (UES) [O'Brien et Toms, 2010; Wiebe *et al.*, 2014] : inspirée sur les travaux de O'Brien et Toms [2008], qui construisent un modèle de l'engagement de l'utilisateur avec les technologies, Wiebe *et al.* [2014] étudient comment une échelle de mesure construite à partir de ce modèle peut être appliquée à des expériences vidéoludiques. Ainsi, cette échelle tient compte de la concentration, de l'utilisabilité perçue, de l'esthétique et de la satisfaction. Ce dernier facteur est un agrégat de l'endurabilité, de la nouveauté perçue et de l'implication ressentie, comme définie par l'échelle de O'Brien et Toms [2010]. En lien avec notre objectif de recherche et nos expérimentations, nous ne traiterons pas le facteur de l'esthétique, le *biofeedback* n'ayant ici d'effet que sur les caractéristiques de l'interaction.

— Le *Game User Experience Satisfaction Scale* (GUESS) [Phan *et al.*, 2016] : ce questionnaire est issu d’un modèle créé pour mesurer la satisfaction provoquée par une expérience de vidéo-ludique. Les auteurs indiquent que l’engagement, l’immersion, la présence et le *flow* sont des éléments clés dans le ressenti de la satisfaction. Si elle est centrale dans ce modèle, elle comporte de nombreux facteurs que nous souhaitons mesurer dans nos expérimentations. Ils proposent ainsi, un modèle composé de neuf facteurs : (1) l’utilisabilité ou la jouabilité, (2) la narration, (3) la passion ludique, (4) le plaisir, (5) la liberté créative, (6) l’esthétique audio, (7) la satisfaction personnelle, (8) la connectivité sociale et (9) l’esthétique visuelle. Comme pour le questionnaire précédent, nos travaux portant sur les interactions par le *biofeedback*, nous considérons qu’il n’a pas d’impact direct sur les caractéristiques esthétiques (visuelles et sonores), ni sur la narration et la liberté créative, inhérentes à l’application davantage qu’à l’interaction.

TABLEAU 3.1 – Synthèse des questionnaires permettant l’évaluation des différents facteurs de l’engagement utilisateur, répartis en fonction des facteurs les plus souvent présents dans les modèles observés. Les autres dimensions pertinentes pour notre étude sont listées dans une colonne additionnelle.

	Utilisabilité	Implication	Concentration	Autres
Presence Questionnaire (PQ) [Witmer et Singer, 1998]	X	X	X	Présence, immersion
AttrakDiff [Hassenzahl <i>et al.</i> , 2003]	X			Gratification
Game Engagement Questionnaire (GEQ) [Brockmyer <i>et al.</i> , 2009]		X	X	Présence, dissociation
User Engagement Scale (UES) [Wiebe <i>et al.</i> , 2014]	X	X	X	Nouveauté
Game User Experience Satisfaction Scale (GUESS) [Phan <i>et al.</i> , 2016]	X	X		Gratification

Sentiment d’agentivité

Si l’agentivité fait le plus souvent référence à la sensation de contrôle des mouvements de notre propre corps, notre étude de la littérature nous a permis de démontrer qu’il était possible d’éprouver un sentiment d’agentivité lorsque nous étions au contrôle de notre physiologie. Dans le cadre de notre seconde étude, la mesure du sentiment d’agentivité ressenti par les participants est cruciale pour la compréhension des impacts de l’utilisation du rythme cardiaque comme une mécanique d’interaction obligatoire. Dans la littérature, cette notion est généralement adressée directement par des évaluations subjectives. Nous avons adaptés des travaux récents en adaptant les questions à nos situations d’expérimentations [Argelaguet *et al.*, 2016; Debarba *et al.*, 2015; Gorisse *et al.*, 2017] et avons reformulé les questions pour que celles-ci soient cohérentes avec les tâches que nous proposons. Nous formulons trois ques-

tions portant sur l'utilisation du rythme cardiaque et sur ses conséquences sur l'agentivité, concernant initialement l'agentivité motrice :

- Dans quelle mesure avez-vous été capable d'interagir avec l'environnement de la manière dont vous souhaitiez ?
- Dans quelle mesure avez-vous trouvé les tâches de contrôle cardiaque difficiles à réaliser ?
- Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le contrôle de votre rythme cardiaque vous permettait d'influencer les mécanismes du jeu ?

3.2.2 Méthodes qualitatives

Si l'expérience utilisateur peut être évaluée de à l'aide de mesures physiologiques ou par des questionnaires avec de bonnes caractéristiques psychométriques, elle est par définition subjective et propre à l'interprétation de la personne qui en rend compte. Ainsi, il est important pour comprendre toute la portée de celle-ci, de collecter les ressentis subjectifs des participants, que ce soit par écrit ou par oral. De nombreuses méthodes existent pour collecter ce type de données, comme des entretiens directifs, semi-directifs ou non-directifs. Ces derniers permettent de récolter des informations qui n'ont pas nécessairement été recueillies dans les questionnaires et peuvent laisser une plus grande liberté d'expression aux participants, leur permettant d'exprimer une palette de ressentis plus large. Des groupes de discussions permettent de mener des échanges collectifs autour du sujet d'étude grâce à un animateur. Enfin, à la marge de ces échanges avec les participants, il est possible de mener une observation directe, permettant l'étude de phénomènes spécifiques, notamment comportementaux.

Dans le cadre de nos travaux, nous proposons des expériences mono-joueur, de plus l'utilisation de données liées aux ressentis et à l'expérience subjective, tel que le rythme cardiaque nous a amenés à écarter les entretiens de groupes. Lors des différentes expérimentations nous leur avons préférés l'observation en situation, pour atténuer au maximum les biais comportementaux, ou réaction de prestance, induits par les situations de groupes. De plus, nous avons mis en place des entretiens semi-directifs à la fin de nos expérimentations pour permettre aux participants de nous faire part de leur ressentis et commentaires. Nous prendrons en compte des notions liées à l'utilisation des données physiologiques, tant sur l'engagement et l'agentivité que sur le concept de vie privée. Nous nous intéresserons enfin aux apports et aux perspectives que les utilisateurs imaginent par rapport aux expériences vécues. Ces entretiens seront enregistrés et retranscrits pour permettre une analyse sémantique visant à catégoriser les réponses, identifier la présence de propos récurrents ou encore mettre en lumière des concepts que nous n'aurions pas identifiés au préalable.

Chapitre 4

Expérimentation 1 : la peur comme mécanique de jeu physiologique en réalité virtuelle

Sommaire

4.1	Résumé	68
4.2	Objectif et activité proposée	69
4.3	Matériel et méthodes	71
4.3.1	Appareillage	71
4.3.2	Jeu virtuel	72
4.3.3	Variables et mesures	75
4.3.4	Procédure expérimentale	75
4.3.5	Participants	78
4.3.6	Hypothèses	78
4.4	Résultats	79
4.4.1	Contrôle du rythme cardiaque	79
4.4.2	Utilisabilité perçue	81
4.4.3	Implication ressentie	82
4.4.4	Nouveauté	84
4.4.5	Fiabilité et confort	84
4.4.6	Jugements subjectif et préférences	86
4.5	Discussion	87
4.6	Limitations	90

4.1 Résumé

La réalité virtuelle est aujourd'hui une technologie financièrement abordable et commence à pénétrer le marché de masse. Bien que les systèmes portables (e.g. *cardboard*) soient les plus distribués, ils manquent d'interactions adaptées pour fournir des expériences vraiment engageantes. Ainsi, nous avons émis l'hypothèse que l'intégration d'un bracelet intelligent dans une expérience de réalité virtuelle permet une utilisation suffisamment fiable et confortable pour ajouter du *biofeedback* à un jeu. De plus, nous avons soumis la seconde hypothèse que l'utilisation d'une boucle de *biofeedback* dans une expérience de réalité virtuelle peut améliorer l'engagement utilisateur dans une expérience virtuelle immersive. Pour éprouver ces hypothèses, nous avons créé un jeu d'horreur physiologiquement amélioré, couplé à un bracelet intelligent pour suivre la fréquence cardiaque. Nous avons évalué l'engagement et la nouveauté rapportée par les participants avec et sans *biofeedback*. Nous observons ainsi un grand intérêt des participants pour l'intégration des *wearables* dans des systèmes de réalité virtuelle et pour l'utilisation du *biofeedback*. Nos résultats mettent également en évidence que l'intégration du *biofeedback* dans le jeu entraîne une augmentation de l'engagement utilisateur, lorsque cette mécanique est pleinement intégrée dans l'expérience. Enfin, nous soulignons l'absence d'inconfort causé par l'ajout du bracelet et la stabilité de notre système, dans une situation où les participants sont en mouvement, le qualifiant pour les expériences de réalité virtuelle.



FIGURE 4.1 – Illustration de la créature présente dans notre jeu en réalité virtuelle, que le joueur doit esquiver afin de survivre

4.2 Objectif et activité proposée

Les conclusions de notre revue de littérature nous ont permis de mettre en exergue les nombreux facteurs de l'expérience utilisateur en réalité virtuelle. Parmi ceux-ci, nous avons identifié principalement l'immersion [Biocca, 2003; Slater, 2003], la présence [Bouvier, 2009; Wiebe *et al.*, 2014] et l'engagement [O'Brien et Toms, 2008]. Les travaux de Bouvier [2009], comme ceux de Geslin [2013], défendent l'idée d'un lien entre la présence et les émotions, mettant en avant que le sentiment de présence ne peut émerger durablement que lors d'une expérience porteuse d'émotions. Lessiter *et al.* [2001] expriment qu'il existe un lien entre la présence et l'engagement. Ainsi, en proposant une expérience porteuse d'émotions, il semble possible d'augmenter le niveau d'engagement.

Comme démontré dans notre état de l'art, il est possible de capter des émotions grâce à la physiologie. Dans le domaine du jeu vidéo, notamment, de nombreuses études ont cherché à exploiter les données physiologiques pour augmenter des expériences interactives [Ambinder, 2011; Li *et al.*, 2015; Mirza-Babaei *et al.*, 2011]. En contrôlant ses émotions par un *biofeedback*, il serait ainsi possible d'augmenter la présence et donc l'engagement (voir figure 4.2). Ainsi, nous avons pour objectif de proposer une expérience virtuelle immersive augmentée *via* le rythme cardiaque du participant. Nous proposons une boucle de *biofeedback* basée sur une émotion, la peur. Cette émotion est en effet l'une des plus simples à induire en environnement virtuel et ne demande pas une immersion longue pour être induite [Dey *et al.*, 2017]. Dans notre cas, la peur provoque un cercle « vicieux », c'est-à-dire que plus les participants ont une réaction forte, plus la difficulté augmente. Nous pourrions ainsi observer quels sont les effets de notre *biofeedback* sur le niveau d'engagement. Le jeu est proposé en deux versions différentes : une version augmentée par physiologie et une version sans physiologie. Ce design nous permet d'observer directement les effets du *biofeedback* sur l'expérience utilisateur.

L'intérêt de cette étude est double pour nous. La littérature semble s'accorder sur l'intérêt d'utiliser des *wearables* dans des expériences scientifiques [Gaskin *et al.*, 2017; Reinerman-Jones *et al.*, 2017] ou dans des expériences de divertissement [Hänsel *et al.*, 2018]. Cependant, les limitations de ces outils restent floues lorsqu'il s'agit d'expériences de réalité virtuelle, spécialement lorsque celles-ci impliquent du mouvement. C'est pourquoi nous souhaitons aussi utiliser un bracelet connecté pour récupérer les données physiologiques et étudier comment celui-ci s'intègre à un système de réalité virtuelle complet.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le système que nous avons mis en place pour la réalisation de cette expérience, le matériel ainsi que le jeu en réalité virtuelle que nous

avons développé. Puis nous présenterons le protocole, les données mesurées, la procédure expérimentale ainsi que les participants recrutés. Enfin, les résultats sont présentés et discutés et nous évoquerons les limites de l'étude.

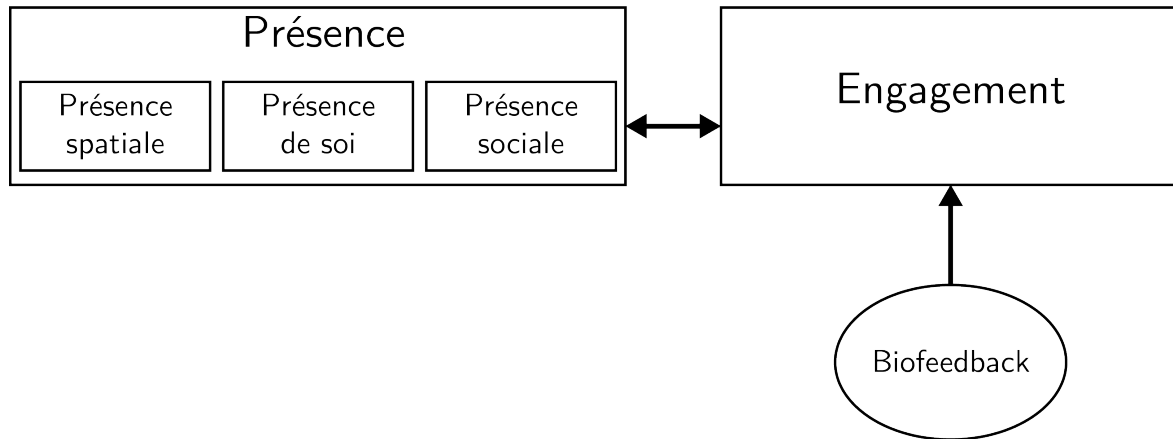


FIGURE 4.2 – Illustration des intrications entre le *biofeedback* et les sentiments de présence et d'engagement

4.3 Matériel et méthodes

Pour étudier les effets du *biofeedback*, nous avons créé un jeu d'horreur en réalité virtuelle augmenté par physiologie, développé sur le moteur 3D Unity 5¹. Pour connecter le capteur cardiaque et transmettre les données au jeu, nous avons développé une application tierce. Cette section détaille le système et les applications.

Les équipements utilisés pour cette expérience sont :

- un système de réalité virtuelle *HTC Vive*[®];
- un ordinateur de bureau (*Intel Xeon E5-1603*[®], 8GB de RAM et une carte graphique *Nvidia Geforce GTX 1060*[®]);
- un bracelet connecté *Mio LINK*[®].

4.3.1 Appareillage

Nous avons décidé d'utiliser un casque de réalité virtuelle *HTC Vive*[®] pour l'immersion et l'interaction, principalement pour le système *room-scale* qui permet de créer des expériences impliquant de la mobilité. L'espace de navigation a été défini comme une zone de 3 mètres par 3 mètres.



FIGURE 4.3 – La configuration complète utilisée pour les expérimentations.

Pour la captation physiologique, nous utilisons le *Mio LINK*[®], un bracelet connecté capable de mesurer le rythme cardiaque. Ce dernier permet d'estimer l'état psychophysiologique d'un utilisateur, le niveau de stress ou de relaxation, d'interpréter des émotions basiques (e.g., joie, tristesse ou peur). Durant le développement de cette expérience et grâce à des recherches

1. <https://unity3d.com/>

étendues sur Internet, nous avons découvert qu'il y avait un défaut de construction répandu sur le *Mio LINK*[®]. En effet, la distance de transmission des données est très courte (approximativement 10 centimètres). Pour pallier cette limite, nous avons dû intégrer dans notre configuration une clé Bluetooth supplémentaire, branchée sur le casque HTC et attachée au bras de l'utilisateur.

4.3.2 Jeu virtuel

L'objectif de cette expérience est d'induire un sentiment de peur chez l'utilisateur, l'une des émotions les plus simples à induire *via* un environnement virtuel [Dey *et al.*, 2017]. Lobel *et al.* [2016] ont de plus démontré l'intérêt de l'utilisation de jeux d'horreur, augmentés par *biofeedback*, dans le cadre d'études sur la psychophysiologie. Nous avons ainsi développé un environnement virtuel inspiré de l'époque Victorienne (inspiration qui peut être retrouvée dans de nombreux jeux vidéo, par exemple *Bioshock Infinite*²). Le jeu se passe dans une pièce d'un manoir (représentée sur les figures 4.4), la taille de celle-ci étant identique à la zone de tracking du Vive. Nous avons choisi « d'enfermer » l'utilisateur dans un espace relativement confiné pour augmenter l'effet effrayant. La pièce principale donne sur deux pièces adjacentes et une cage d'escalier qui sont inaccessibles, car situées en dehors de la zone de tracking. Dans cette pièce, se trouvent une cheminée, un candélabre ainsi qu'un lustre qui permettent de l'éclairer. L'ambiance sonore du jeu a aussi été construite pour aider à induire un sentiment de peur. Nous avons ainsi intégré différents bruits de pas, spatialisés, des bruits de courants d'air et des sons de portes grinçantes.

Pour fournir une expérience engageante, nous avons mis en place un objectif à atteindre. Le joueur doit retarder l'arrivée d'une créature attirée par le bruit (représentée par l'archétype de la « petite fille » largement représenté dans le genre horreur, visible sur la figure 4.1). La créature peut apparaître de manière aléatoire à l'une des trois entrées de la pièce (les deux pièces adjacentes et l'escalier). Pour ne pas l'attirer, le joueur doit limiter le bruit dans la pièce en fermant les portes et la boîte à musique posée sur la cheminée. Ces trois éléments s'ouvrent de manière répétée et aléatoire durant tout le jeu. Lorsque la créature apparaît, elle se dirige lentement vers le joueur. Plus elle est proche du joueur, plus elle va vite : elle commence debout, puis se met à quatre pattes avant de se ruer sur le joueur. Le personnage que l'on incarne est quant à lui uniquement équipé d'une lampe torche, il doit illuminer la créature lorsque celle-ci surgit pour la faire disparaître. S'il n'arrive pas à faire disparaître la créature avant qu'elle attaque, alors le jeu prend fin. S'il réussit à l'illuminer assez longtemps,

2. Irrational Games - <https://bioshockinfinite.ghoststorygames.com/the-game> - 2013

la créature disparaît temporairement mais peut revenir s'il y a eu de nouveau suffisamment de bruit.

Après une phase de tutoriel rapide, durant laquelle le joueur se familiarise avec l'environnement et les interactions, la nuit tombe et le joueur doit survivre pendant 5 minutes avant que le soleil ne se lève et que la partie se termine.

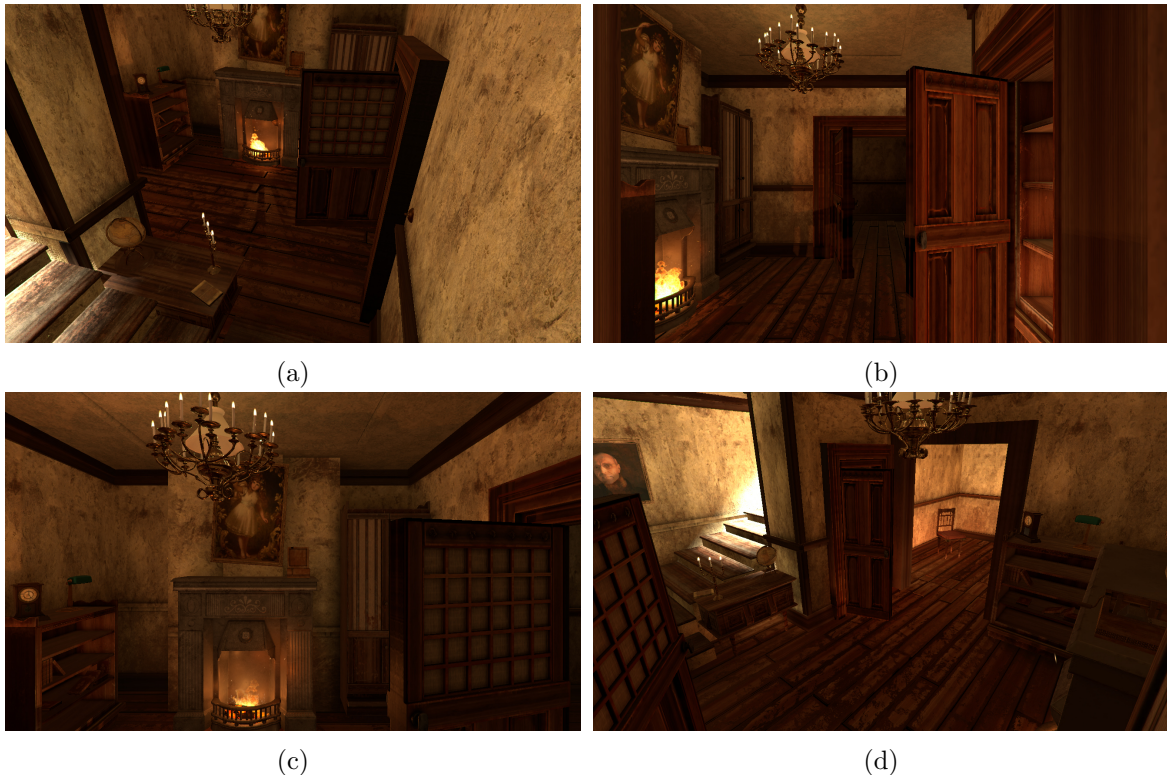


FIGURE 4.4 – Différents points de vue de la pièce principale du manoir dans laquelle le joueur est confiné.

Calibration

Pour estimer l'état psychophysiologique d'un participant, nous analysons l'évolution des relevés physiologiques comparée à la valeur au repos. Celle-ci est déterminée grâce aux travaux de Nogueira *et al.* [2016] et de Dekker et Champion [2007]. Nous enregistrons donc les valeurs de rythme cardiaque du participant pendant une période de 2 minutes et 30 secondes, temps durant lequel celui-ci écoute la musique « *Union's Weightless* ». Durant cette période, nous enregistrons ainsi 150 valeurs de relevé de rythme cardiaque (en nombre de battements par minute). Les participants sont tout d'abord assis (pendant 1 minute et 15 secondes) puis debout (pendant 1 minute et 15 secondes), étant donné que le rythme cardiaque peut varier entre ces deux positions. Une moyenne de ces valeurs de rythme cardiaque est ensuite calculée pour déterminer la valeur du rythme cardiaque du participant au repos.

Rétroaction biologique

Pour étudier les effets du *biofeedback* sur l'expérience utilisateur, nous mettons en place une mécanique liant le caractère effrayant de l'expérience à la force de la peur ressentie par le participant. Afin de déterminer des seuils fonctionnels pour le jeu, nous avons effectué des séries de pré-tests avec les membres de notre laboratoire. Ainsi, les données cardiaques, captées par le bracelet *Mio LINK*[®], influent sur différents éléments du jeu :

- Lorsque le rythme cardiaque est au moins 15 BPM au-dessus de la valeur calibrée, la lumière émise par la cheminée diminue et la fréquence d'ouverture des portes et de la boîte à musique augmente.
- Lorsque le rythme cardiaque est au moins 20 BPM au-dessus de la valeur calibrée, le participant entend un battement cardiaque, lent et faible.
- Lorsque le rythme cardiaque est au moins 30 BPM au-dessus de la valeur calibrée, le battement cardiaque est plus rapide et plus fort.
- Lorsque le rythme cardiaque est au moins 40 BPM au-dessus de la valeur calibrée, le champ de vision du participant commence à se réduire, et peut devenir complètement fermé, laissant le joueur dans le noir.

Si le rythme cardiaque du joueur redescend en dessous de ces seuils et approche la valeur calibrée, alors les éléments modifiés retrouvent leur fonctionnement initial, encourageant le joueur à garder son calme pour ne pas augmenter la difficulté du jeu.

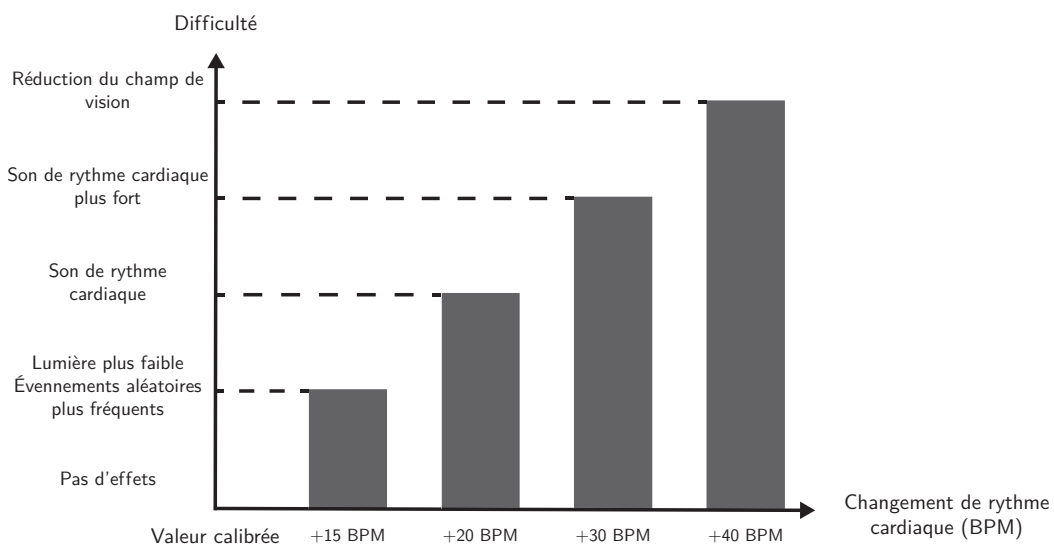


FIGURE 4.5 – Graphique représentant l'augmentation de la difficulté, due aux modifications de l'environnement, en fonction de l'état physiologique du joueur.

4.3.3 Variables et mesures

La présence du *biofeedback* est utilisée comme une variable indépendante. Cette expérience sera conduite selon un design inter-sujet :

- Sans *biofeedback* : le jeu n'est pas augmenté par la physiologie.
- Avec *biofeedback* : le jeu est augmenté grâce au rythme cardiaque du joueur, causant des changements sur les mécaniques de jeu et l'environnement.

Les variables dépendantes sont la durée de l'expérience et sa complétion, les réponses des participants au questionnaire post-expérience et les relevés de rythme cardiaque. Pour obtenir un retour de la part des participants sur l'expérience, nous avons construit un questionnaire basé sur le « *Presence Questionnaire* » de Witmer et Singer [1998] ainsi que sur le « *User Engagement Scale* » de Wiebe *et al.* [2014]. Pour mesurer le niveau d'engagement utilisateur, nous avons évalué, par des échelles sémantiques différentielles, le sentiment de nouveauté, l'utilisabilité perçue, l'implication et la concentration. Nous avons également ajouté des questions sur le confort d'utilisation du *wearable*. Le questionnaire complet est présenté dans le tableau 4.1.

Les participants expérimentent chaque version du jeu, de manière contrebalancée, pour pouvoir répondre à une série de questions comparant les deux expériences. Cependant, pour éviter tout biais lié à l'importance de l'effet du sentiment de peur dans l'expérience, nous avons décidé d'enregistrer la nouveauté, l'utilisabilité perçue, l'implication et la concentration uniquement après la première passation. Après avoir expérimenté la version du jeu avec le *biofeedback*, les participants répondent aussi à des questions concernant son utilisation et son apport à l'expérience.

4.3.4 Procédure expérimentale

Dans un premier temps, les participants sont invités à se rendre dans la pièce où se déroule l'expérimentation et ils doivent lire un formulaire de consentement et un autre formulaire leur demandant de confirmer qu'ils n'ont pas de problèmes cardiaques et qu'ils connaissent les risques liés à la réalité virtuelle. Ils sont informés qu'ils peuvent retirer le casque et mettre un terme à l'expérimentation à tout moment s'ils ressentent une gêne quelconque. Les participants sont informés de l'utilisation de leur données physiologique dans le cadre du jeu. S'ils acceptent et signent les formulaires, ils complètent ensuite un questionnaire pré-expérience, pour collecter des informations concernant leur profil (âge, sexe, niveau d'expérience avec la réalité virtuelle et les jeux vidéo, types de jeux joués, sensibilité à la cyber-cinétose).

CHAPITRE 4. EXPÉRIMENTATION 1 : LA PEUR COMME
MÉCANIQUE DE JEU PHYSIOLOGIQUE EN RÉALITÉ VIRTUELLE

TABLEAU 4.1 – Questionnaire post-expérience composé de 6 dimensions : Nouveauté - NO ; Utilisabilité perçue - PU ; Implication ressentie - FI ; Concentration - FA ; *Wearable* - WR ; Comparaison - CP.

ID	Questions
NO1	Dans quelle mesure étiez-vous intéressé par l'objectif de jeu ?
NO2	Dans quelle mesure les mécaniques de jeux ont-elles suscité votre curiosité ?
PU1	Dans quelle mesure étiez-vous capable d'accomplir les tâches que vous deviez réaliser durant le jeu ?
PU2	Dans quelle mesure l'environnement était-il réactif aux actions que vous avez initiées (ou avez réalisées) ?
PU3	Dans quelle mesure avez-vous ressenti que les mécaniques de jeux étaient mentalement exigeantes ?
PU4	Dans quelle mesure avez-vous trouvé les mécaniques de jeux confuses à utiliser ?
PU5	Dans quelle mesure avez-vous ressenti de la frustration durant le jeu ?
PU6	Dans quelle mesure l'expérience de jeu vous a-t-elle paru exigeante ?
FI1	Dans quelle mesure étiez-vous absorbé par les tâches à réaliser dans le jeu ?
FI2	Dans quelle mesure tous vos sens étaient-ils engagés ?
FI3	Dans quelle mesure étiez-vous impliqué dans l'expérience ?
FI4	Dans quelle mesure avez-vous trouvé l'expérience de jeu amusante ?
FI5	Dans quelle mesure avez-vous trouvé l'expérience effrayante / stressante ?
FA1	Selon vous, combien de temps a duré la partie de jeu ?
FA2	Dans quelle mesure avez-vous prêté attention au monde réel durant l'expérience ?
WR1	Dans quelle mesure le bracelet a-t-il provoqué une gêne durant l'expérience ?
WR2	Durant l'expérience, à combien de reprises votre concentration s'est-elle portée sur le bracelet plutôt que sur le jeu ?
WR3	Lors de l'expérience, l'utilisation du bracelet vous a-t-elle paru naturelle ?
CP1	Laquelle de ces deux expériences avez-vous préférée ?
CP2	Avez-vous ressenti des différences entre les deux expériences ?

Nous avons réparti les participants dans deux groupes de passation distincts, un groupe réalisant l'expérience avec le *biofeedback* (BF) et l'autre réalisant l'expérience sans le *biofeedback* (NBF). Cette répartition indique quelle condition sera réalisée en premier par les participants, seule condition sur laquelle nous étudierons la nouveauté, l'utilisabilité perçue, l'implication et la concentration, comme mentionné précédemment. Indépendamment du groupe auquel ils sont assignés, les participants sont équipés du bracelet *Mio LINK*[®]. S'ils font partie du groupe avec le *biofeedback* actif (BF), nous commençons par effectuer la phase de calibration. Une fois la calibration terminée, les participants sont équipés du casque de RV et nous leur expliquons que leur rythme cardiaque sera utilisé durant l'expérience comme une mécanique de jeu, en leur indiquant que plus ils seront effrayés, plus le jeu deviendra difficile. Nous informons aussi les participants qu'ils peuvent retirer le casque et mettre un terme à l'expérience à tout moment s'ils ne se sentent pas à l'aise. Nous leur indiquons ensuite qu'une voix off va leur expliquer le contexte et les objectifs du jeu. Lorsque celle-ci a terminé, les participants peuvent poser à l'expérimentation des questions s'il leur manque des informations. Une fois que nous avons répondu à leurs questions, l'expérience débute. La procédure est identique pour les participants du groupe sans *biofeedback* (NBF), à la différence qu'ils n'effectuent pas la phase de calibration et que nous ne mentionnons pas l'utilisation du rythme cardiaque.

Une fois terminée la première passation, les participants répondent au questionnaire post-expérience. S'ils font partie du groupe BF alors ils répondent aux questions concernant l'utilisation du *biofeedback*. Cette période permet aussi aux participants de retrouver un rythme cardiaque proche de celui au repos. Après avoir complété le questionnaire, les participants se « rééquipent » pour refaire l'expérience mais cette fois dans la condition opposée (en faisant une calibration de leur rythme cardiaque le cas échéant). Enfin ils répondent aux questions comparant les deux expériences et nous concluons l'expérimentation par un entretien semi-directif pour collecter des retours subjectifs.

Nous avons choisi de ne pas proposer aux participants de méthodes pour tenter de contrôler leur réponse physiologique, de manière à évaluer leur capacité spontanée à faire face à cette mécanique de jeu. Nous voulions évaluer la capacité de la mécanique de *biofeedback* à être par la suite implémentée directement dans des expériences de divertissement, sans devoir passer au préalable par des phases d'apprentissage longues et exigeantes.

4.3.5 Participants

Nous avons recruté 32 participants pour cette expérimentation, ils ont été répartis de la manière suivante : 17 ont été placés dans le groupe sans le *biofeedback* (NBF) et les 15 autres étaient dans le groupe avec le *biofeedback* (BF), pour équilibrer les groupes en fonction de l'expérience et du sexe des participants (4 femmes dans un groupe et 5 dans le second, et une personne ne jouant jamais au jeux vidéo dans chaque groupe). Il y avait 9 femmes et 23 hommes, leur âge allant de 21 à 44 ans ($M=25,3$, $ET=5,5$). Nous avons volontairement sélectionné des personnes familières avec la réalité virtuelle, pour éviter que celles-ci ne soient pas plus concentrées sur la découverte de la technologie que sur l'expérience en elle-même. Ainsi, à la question « Quelle est votre expérience de la réalité virtuelle ? », sur une échelle de sémantique différentielle, allant de 1 (faible, « je n'ai jamais utilisé de système de réalité virtuelle ») à 5 (forte, « c'est mon outil de travail »), le score moyen était de 4,06 ($ET=0,84$). De nos 32 participants, seuls 2 ont indiqué ne jamais jouer aux jeux vidéo, 5 jouent de temps en temps, 6 régulièrement et 19 sont des joueurs assidus. Notre panel nous permettait donc de limiter le biais posé par l'effet impressionnant du média, en plus de nous assurer une certaine habitude des expériences vidéo-ludiques.

4.3.6 Hypothèses

- **H1** : La présence du *wearable* ne dérange pas l'utilisateur, ne provoquant pas de problèmes de confort dans le système.
- **H2** : Le *wearable* permet d'obtenir des mesures suffisamment qualitatives pour être utilisé dans des expériences de RV.
- **H3** : Les utilisateurs sont capables d'influencer leur rythme cardiaque durant le jeu.
- **H4** : L'addition du *biofeedback* module la difficulté de prise en main du jeu, le rendant plus difficile à maîtriser.
- **H5** : L'introduction du *biofeedback*, via le rythme cardiaque, augmente l'implication utilisateur.

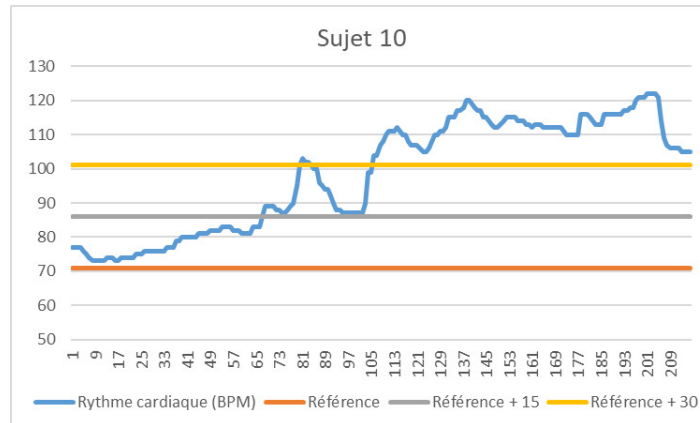
4.4 Résultats

Le test de Shapiro-Wilk réalisé sur les données collectées a démontré la non-normalité de la distribution des réponses au questionnaire. Ainsi, nous avons réalisé des tests non-paramétriques de Mann-Whitney sur les variables de nouveauté rapportée, d'utilisabilité perçue, d'implication et de concentration. Afin d'analyser les résultats de notre expérience, nous avons premièrement étudié la capacité des participants au contrôle cardiaque. Nous avons ensuite regardé l'impact du *biofeedback* sur l'utilisabilité perçue, l'implication, la concentration et la nouveauté rapportée. Enfin nous avons analysé qualitativement la fiabilité du système et l'inconfort provoqué par le *wearable*.

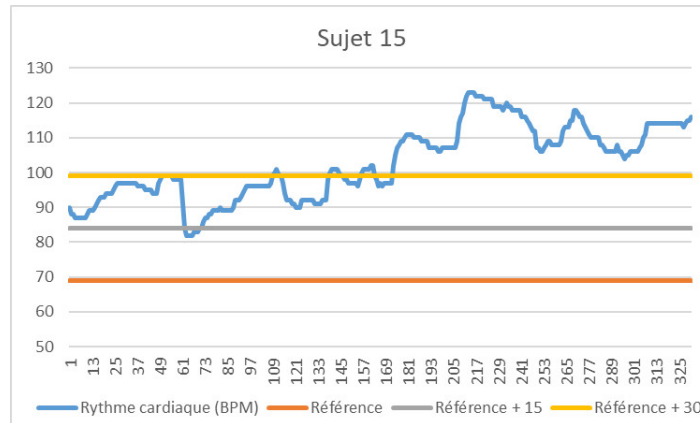
4.4.1 Contrôle du rythme cardiaque

Après la passation avec la condition *biofeedback* (BF), nous demandons aux participants s'ils ont essayé de contrôler leur rythme cardiaque durant le jeu et combien de fois (jamais, une ou deux fois, plusieurs fois, ou durant l'intégralité du jeu). De plus, pour observer à quel point il est possible « d'influencer » son propre rythme cardiaque, pour répondre aux objectifs du jeu, nous avons observé les relevés de rythme cardiaque de nos participants et les avons confrontés aux réponses des participants. Ces résultats sont détaillés dans la suite de cette section.

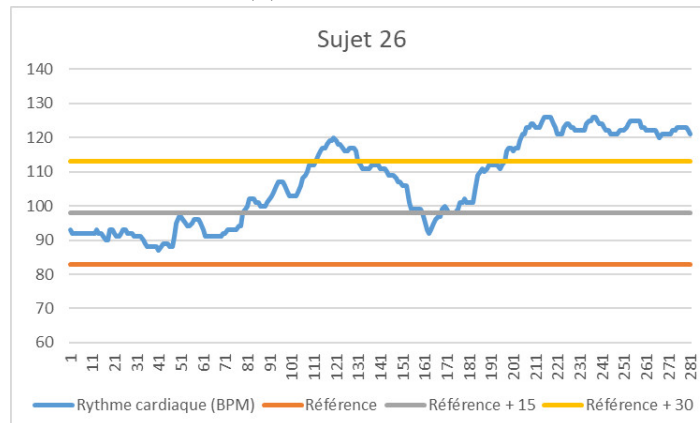
Sur les 32 participants, 19 ont rapporté avoir essayé d'influencer leur rythme cardiaque durant leur passation avec le *biofeedback* (11 ont essayé une ou deux fois durant le jeu, 7 ont essayé à de multiples reprises et 1 a essayé de le contrôler durant l'intégralité du jeu). Des 13 participants n'ayant pas essayé de contrôler leur rythme cardiaque, 8 ont dit être trop absorbés dans l'expérience de jeu et ont mis de côté cette mécanique. Tandis que les 5 restants n'ont pas déclenché les modifications liées à la physiologie (leur rythme cardiaque restant proche de sa valeur de référence) et n'ont donc pas eu besoin de prendre en compte cette mécanique, rapportant n'avoir jamais essayé de contrôler leur rythme cardiaque durant l'expérience.



(a) Sujet numéro 10



(b) Sujet numéro 15



(c) Sujet numéro 26

FIGURE 4.6 – Graphiques représentant l'évolution des relevés de rythme cardiaque (en BPM en fonction du temps en secondes) de trois participants durant la passation avec *biofeedback*. La première ligne horizontale représente la valeur calibrée, la seconde représente la valeur calibrée plus 15 BPM et la troisième représente la valeur calibrée plus 30 BPM. (a) Le participant a rapporté ne pas avoir essayé de contrôler son rythme cardiaque. (b) Le participant a rapporté avoir essayé de contrôler son rythme cardiaque à de multiples reprises durant l'expérience. (c) Le participant a rapporté avoir essayé de contrôler son rythme cardiaque une ou deux fois durant l'expérience.

Nous avons comparé les réponses des participants avec leur relevé de rythme cardiaque et en avons conclu que 12 des 19 participants ayant rapporté essayer de contrôler leur rythme cardiaque ont effectivement réussi à influencer leur réponse physiologique. La figure 4.6 montre trois relevés caractéristiques de rythme cardiaque durant la passation avec *biofeedback* :

- Le graphique 4.6a représente un sujet qui a rapporté ne pas avoir essayé de contrôler son rythme cardiaque, celui-ci ayant continué à augmenter tout au long de l’expérience.
- Sur le graphique 4.6b, nous n’observons aucune réduction significative du rythme cardiaque sur une période de temps étendu, bien que le sujet ait rapporté avoir essayé de contrôler son rythme cardiaque à de multiples reprises durant l’expérience.
- Le graphique 4.6c représente le rythme cardiaque d’un sujet ayant confié avoir essayé de contrôler son rythme cardiaque une ou deux fois durant l’expérience. Nous pouvons observer, à partir de la deuxième minute de jeu, une chute significative de son rythme cardiaque sur une durée de temps étendue, c’est pourquoi nous concluons qu’il a réussi à contrôler sa réponse physiologique durant la partie.

4.4.2 Utilisabilité perçue

Les résultats des tests de Mann-Whitney indiquent des différences significatives pour les questions PU1 ($Z = -2,070$, $p = 0,038$) et PU2 ($Z = -2,280$, $p = 0,023$), en faveur de la version sans *biofeedback*. Bien qu’il n’y ait pas de différences significatives sur les autres questions sur l’utilisabilité perçue, nous pouvons mettre en avant une tendance à une meilleure utilisabilité perçue pour le groupe NBF (voir la figure 4.7). Ces résultats mènent à la conclusion que l’utilisation du *biofeedback* ajoute de la complexité au jeu.

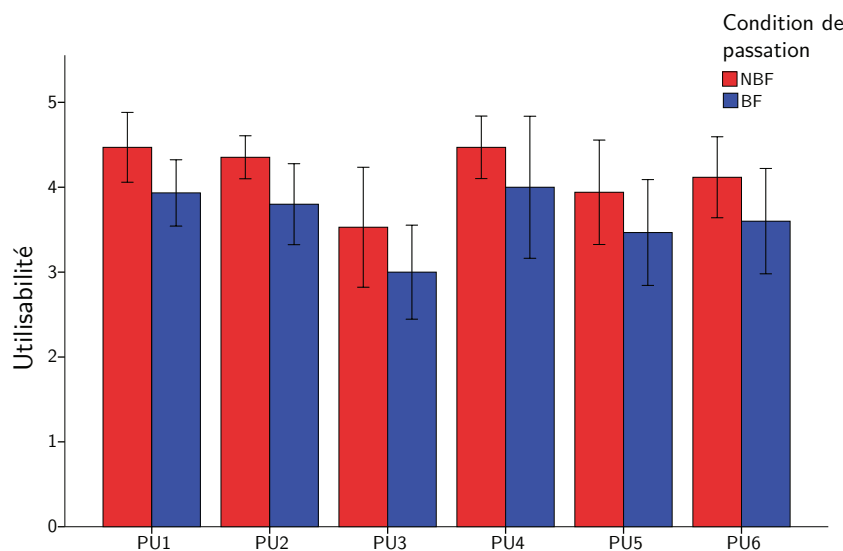


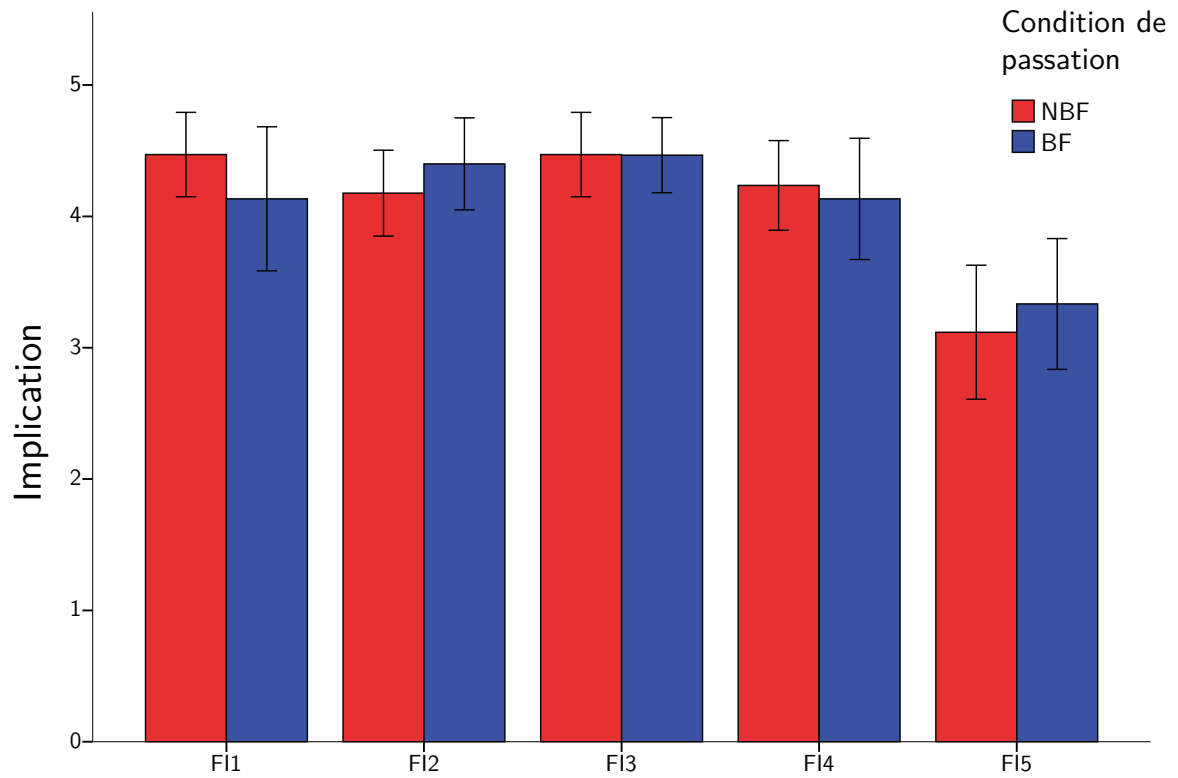
FIGURE 4.7 – Retours subjectifs sur l’utilisabilité perçue de l’application, divisés en deux groupes : sans *biofeedback* (NBF) et avec *biofeedback* (BF).

De plus, nous notons qu'il y a une différence significative entre le temps de survie entre les deux groupes, les participants du groupe NBF survivant plus longtemps que ceux du groupe BF (temps moyen de survie du groupe BF = 131,27 secondes, temps moyen de survie du groupe NBF = 180,59 secondes, $Z = -2,798$, $p = 0,005$). Ce résultat était prévisible, ajouter une nouvelle mécanique d'interaction peut rendre un jeu plus complexe à prendre en main. Cet effet est d'autant plus important quand il s'agit de *biofeedback*, qui n'est pas une mécanique immédiatement contrôlée par le joueur. Cependant, malgré cette apparente détérioration de l'utilisabilité, les résultats sont tout de même positifs, les participants rapportant une forte utilisabilité perçue dans les deux groupes.

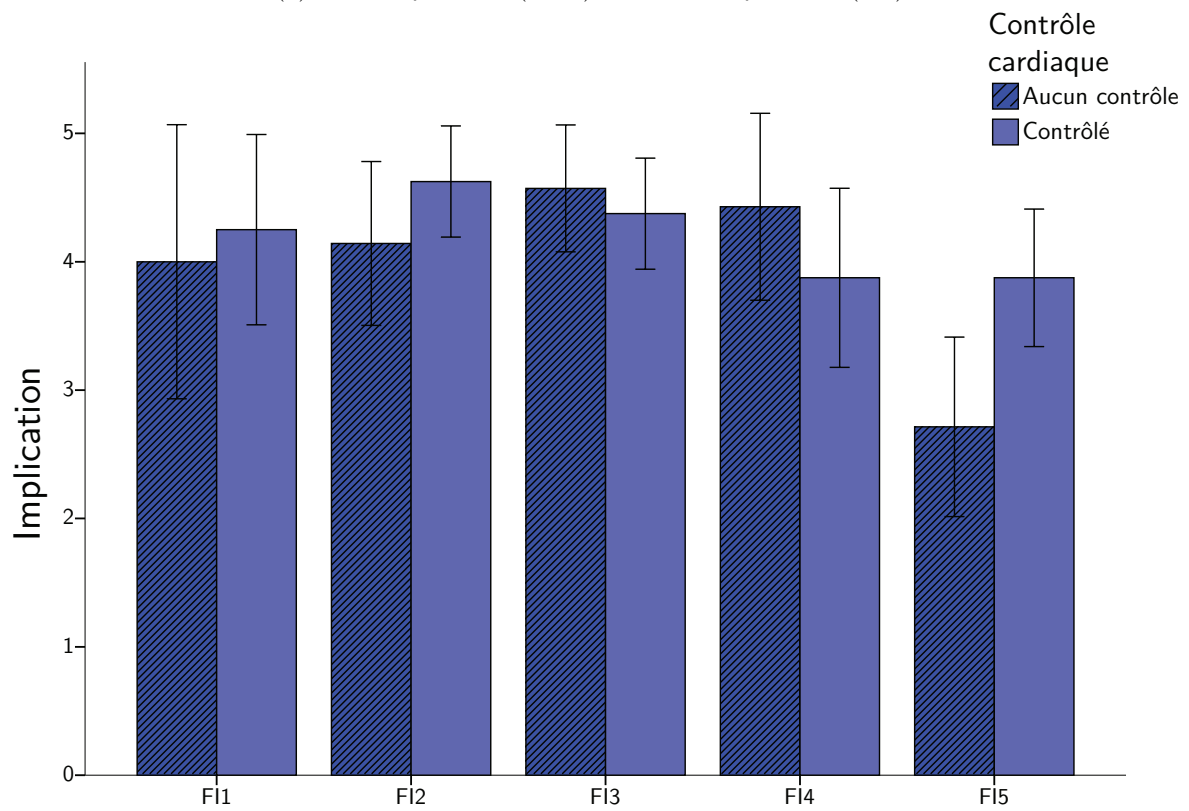
4.4.3 Implication ressentie

Notre analyse n'a pas montré de différences significatives pour les questions concernant l'implication. Nous observons des scores sensiblement aussi élevés dans les deux conditions (voir la figure 4.8a). Concernant la question FA2, les résultats montrent que les participants n'ont pas porté attention au monde extérieur ($M=4,28$, $ET=0,888$), sans différences significatives entre les groupes. Les participants ont aussi rapporté avoir passé beaucoup plus de temps dans le jeu que le temps réel, indépendamment de la condition de passation (FA1, *différence moyenne* = 249 secondes, $ET = 221$ secondes, *Maximum* = 840 secondes, *Minimum* = 71 secondes).

Nous avons alors décidé d'effectuer une analyse plus en détails des résultats des participants du groupe BF. Nous avons donc opposé les participants qui ont essayé de contrôler leur rythme cardiaque ($N = 8$) et ceux du groupe qui n'ont pas essayé de contrôler leur rythme cardiaque ($N = 7$). Nous observons que les participants qui ont tenté de contrôler leur rythme cardiaque ont rapporté un niveau de peur significativement plus élevé que ceux qui n'ont pas essayé de contrôler leur rythme cardiaque (FI5, $Z = -2,508$, $p = 0,012$). Bien que les autres questions ne présentent pas de différences significatives, nous observons une tendance indiquant un plus fort niveau d'implication des participants ayant essayé de contrôler leur rythme cardiaque (voir la figure 4.8b).



(a) Sans *biofeedback* (NBF) VS. avec *biofeedback* (BF).



(b) BF sans contrôle du rythme cardiaque VS. BF avec contrôle du rythme cardiaque.

FIGURE 4.8 – Retours subjectifs sur l'implication ressentie.

4.4.4 Nouveauté

Bien que notre panel soit expérimenté en réalité virtuelle, la nouveauté rapportée de l'expérience par le groupe NBF est très élevée. Les deux groupes ont rapporté un fort sentiment de nouveauté (voir le tableau 4.2). Ce résultat est surprenant, en effet, sans le *biofeedback* l'expérience n'apporte à priori rien de nouveau en matière d'expérience immersive à des participants expérimentés en réalité virtuelle. De fait, notre analyse de la nouveauté rapportée ne retourne pas de différences significatives entre les deux groupes, malgré une très légère tendance en faveur du groupe BF.

TABLEAU 4.2 – Scores de nouveauté rapportée.

Groupe	NO1		NO2	
	M	ET	M	ET
NBF	4,06	0,899	3,88	0,862
BF	4,20	0,857	4,20	0,561

4.4.5 Fiabilité et confort

Peu importe le groupe dans lequel les participants étaient placés, ils étaient équipés du bracelet *Mio LINK*[®]. Nous pouvions ainsi collecter des informations concernant le confort d'utilisation du bracelet après la première passation. Les participants ont rapporté que le bracelet ne provoquait aucun inconfort durant l'expérience. Sur une échelle sémantique différentielle allant de « 1-Fortement inconfortable » à « 5-Aucun inconfort », le résultat moyen était 4,5 (ET = 0,83). Seul trois participants ont répondu que le bracelet avait provoqué un fort inconfort, en justifiant plus tard que la présence du câble supplémentaire (branché à la clé Bluetooth additionnelle) les avait gênés. Sur les 32 participants, 29 ont mentionné n'avoir jamais porté leur attention sur le bracelet durant l'expérience et les 3 restants n'y ont prêté attention qu'une ou deux fois. De plus, en réponse à la question WR3, les participants ont rapporté un usage naturel du bracelet (M = 4,66, ET = 0,83).

Pour nous assurer de la fiabilité du bracelet, nous avons enregistré les données physiologiques même lors de la condition NBF. Ainsi, durant les expériences, nous n'avons enregistré aucune déconnexion du bracelet Mio, et ce pour les 64 passations que nous avons effectuées. Si la qualité des données collectées était attendue [Wang *et al.*, 2017], nous n'avions pas de certitudes quant à la robustesse du dispositif face aux artefacts de mouvements. En observant les relevés cardiaques, nous n'avons identifié aucune donnée aberrante ; il est possible de constater, sur la figure 4.9, que très peu de données sont considérées comme des valeurs éloignées.

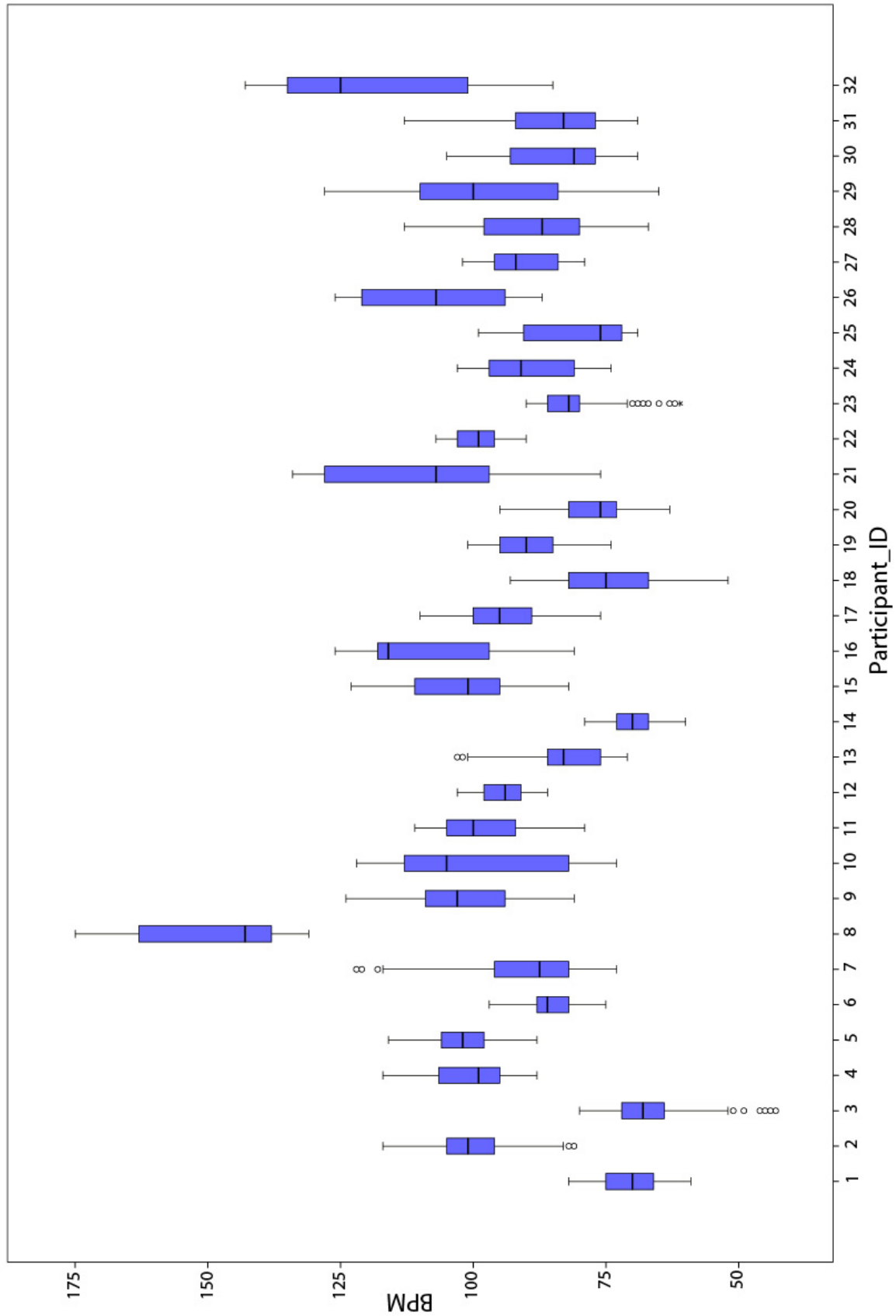


FIGURE 4.9 – Graphiques des valeurs de rythme cardiaque de chaque participant, enregistré lors de la passation avec *biofeedback*.

4.4.6 Jugements subjectif et préférences

Lorsqu'ils avaient réalisé les passations dans les 2 conditions, nous avons demandé aux participants quelle expérience ils avaient préférée. L'expérience intégrant le rythme cardiaque a été plébiscitée par 16 participants sur 32, tandis que 5 ont préféré celle sans rythme cardiaque, les 11 restants n'ont exprimé aucune préférence. Nous avons noté que parmi les 17 participants du groupe ayant débuté l'expérience sans le *biofeedback*, 10 ont préféré la version avec le rythme cardiaque et un seul la version sans *biofeedback*. Tandis que les participants du groupe ayant débuté l'expérience avec le *biofeedback* ont rapporté des résultats plus disparates. En effet, 6 d'entre eux ont préféré l'expérience avec le *biofeedback* tandis que 4 ont préféré celle sans. En confrontant ces observations avec les entretiens menés avec les participants, nous pouvons confirmer l'existence d'un effet d'apprentissage, certains participants expliquant qu'ils « *savaient mieux ce qu'[ils devaient] faire et [ont] vécu une meilleure expérience* ».

Il a été demandé aux participants s'ils avaient noté des différences entre les deux expériences (question CP2). Ils ont rapporté des résultats divers ($M = 3,25$, $ET = 1,16$). L'analyse des relevés de rythme cardiaque nous permet d'observer que 27 des 32 participants ont eu une réaction physiologique suffisamment forte pour atteindre au moins un des seuils d'influence (voir la figure 4.5). Ces résultats sont intéressants à noter car ils semblent indiquer que les participants ont eu des difficultés à reconnaître les différences entre les deux versions du jeu, ce qui peut expliquer l'absence de préférence claire pour l'une ou l'autre version.

Durant les entretiens, nous avons demandé aux participants s'ils trouvaient que l'utilisation des données physiologiques avait un intérêt dans le cadre de la réalité virtuelle (non pas uniquement pour le jeu). L'ensemble des participants a répondu qu'ils trouvaient cette addition intéressante et la quasi-totalité d'entre eux nous a affirmé ne pas être inquiet vis-à-vis de l'utilisation de ces données privées « *tant qu'[ils sont informés] avant de l'utilisation de ces données et qu'elle reste limitée à l'expérience virtuelle* ».

4.5 Discussion

À notre connaissance, cette étude était l'une des premières à explorer l'utilisabilité et la stabilité d'un *wearable* pour enregistrer des données physiologiques dans le cadre d'une expérience en réalité virtuelle incluant une boucle de *biofeedback*. Dans le cadre de cette étude, nous avons conçu une expérience induisant un sentiment de peur. Dans l'ensemble, les résultats que nous avons collectés nous ont permis de valider nos hypothèses.

Nous nous attendions, *a priori*, à ce que le *wearable* s'intègre naturellement dans le système, les participants ne ressentant pas de gêne provoquée par le bracelet. Les retours des participants valident cette hypothèse (H1), le bracelet s'intégrant naturellement dans le système de réalité virtuelle et sa présence étant presque imperceptible durant l'expérience. De plus, l'analyse des valeurs cardiaques enregistrées durant les différentes passations a confirmé la fiabilité du bracelet connecté dans une expérience de réalité virtuelle impliquant du mouvement. En effet nous n'avons pas noté de déconnexion et nous avons observé qu'un nombre marginal de données aberrantes. Ces résultats sont en accord avec les travaux précédents de Züger et Fritz [2015], Muñoz *et al.* [2016b] et Wang *et al.* [2017] sur la fiabilité et l'utilisabilité des *wearables* de suivi cardiaque.

Le fait que la nouveauté perçue n'ait pas permis d'observer de différence significative entre les deux conditions de passation (même si nous observons une légère tendance en faveur du groupe BF) semble indiquer un impact toujours très fort de la réalité virtuelle sur le joueur. En effet, bien que nos participants aient été des utilisateurs expérimentés en réalité virtuelle, la nouveauté perçue était très forte dans les deux conditions.

L'un des objectifs de cette expérience était de confronter les participants à une boucle de *biofeedback* négative, les encourageant à essayer de contrôler leur état psychophysiologique. En les informant avant l'expérience que leur rythme cardiaque influence l'expérience, nous voulions qu'ils se concentrent pour ralentir leur propre rythme cardiaque pour compléter l'expérience. Nos résultats valident partiellement l'hypothèse selon laquelle les participants sont capables d'influer sur leur rythme cardiaque, car seule une partie de ceux-ci ont effectivement réussi. En effet, sur notre panel d'étude, 19 participants ont affirmé avoir tenté de contrôler leur rythme cardiaque, et parmi ces participants, 12 se sont montrés capables d'influer sur leur rythme cardiaque durant le jeu. Si ce nombre semble faible, de nombreux participants n'ont simplement pas essayé d'influer sur leur rythme cardiaque, car ils étaient trop concentrés sur l'expérience, ce qui est également rapporté par les travaux de Dekker et Champion [2007].

De manière surprenante, nous n'avons pas observé de différences significatives entre les deux groupes de passation concernant l'implication. Nous ne pouvons ainsi pas conclure de manière claire que l'addition de la boucle de *biofeedback* avec le rythme cardiaque améliore l'implication des participants (hypothèse H5). Si les participants ont principalement rapporté avoir préféré l'expérience avec physiologie, comme dans plusieurs études précédentes [Dekker et Champion, 2007; Dey *et al.*, 2017; Nacke *et al.*, 2011], ces premiers résultats sur l'implication sont en désaccord avec les travaux de Gilleade *et al.* [2005], dans lesquels la physiologie est un vecteur significatif d'amélioration de l'implication dans un jeu vidéo classique. Les expériences sous casque virtuel apportent un fort niveau d'engagement aux utilisateurs, ce que nous observons dans nos résultats, où le niveau de concentration est très élevé dans chacune des conditions. Il semble plausible d'imputer ce manque de différences significatives à notre implémentation du *biofeedback*. En effet, afin d'éviter que cette mécanique soit porteuse d'un fort sentiment de frustration, nous avons choisi de ne pas la rendre nécessaire à la complétion du jeu. Ainsi, dans un désir de ne pas briser l'équilibre du jeu, les effets du *biofeedback* ne sont peut être pas suffisamment perceptibles pour les participants. S'il semble ne pas y avoir d'effet significatif direct, il est intéressant de noter que lorsque les participants essayent activement d'intégrer la mécanique physiologique dans leur expérience de jeu, alors ils rapportent un plus fort niveau d'implication. En donnant aux participants une plus forte motivation à contrôler leur rythme cardiaque et des marqueurs plus clairs de son effet, le jeu les encouragerait à pleinement prendre en compte le *biofeedback* et ainsi se sentir plus engagé dans l'expérience.

L'addition d'une nouvelle mécanique de jeu, quelle qu'elle soit, peut augmenter la difficulté de prise en main, d'autant plus s'il s'agit d'un *biofeedback*, comme par exemple le contrôle de son propre rythme cardiaque. C'est pourquoi nous avons émis l'hypothèse selon laquelle l'ajout du *biofeedback* augmenterait la difficulté de prise en main du jeu et réduirait l'utilisabilité perçue générale. Le fait qu'il y ait des différences significatives, en faveur de la version sans physiologie, confirme que celle-ci présente une courbe d'apprentissage moins élevée et une moins grande difficulté de prise en main, que la version avec *biofeedback*. Même si ces résultats confirment notre hypothèse H4, nous ne nous attendions pas à ce que les participants rapportent un niveau d'utilisabilité perçue si élevé dans la condition avec *biofeedback*. En effet, si le *biofeedback* rend le jeu plus difficile à maîtriser, les scores d'utilisabilité perçue restent élevés dans les deux modalités. Ceci laisse à penser que le *biofeedback* n'a pas fortement perturbé les participants et n'entrave pas l'expérience en la rendant trop complexe à réussir. Cependant il est important de noter que cette mécanique n'était pas obligatoire pour la complétion du jeu, les participants pouvaient simplement ignorer le *biofeedback*. Cela

pourrait de ce fait justifier pourquoi elle n'était pas si préjudiciable à l'utilisabilité perçue générale.

Enfin, nous notons que les participants indiquent un grand intérêt pour la combinaison des deux technologies (*wearable* et réalité virtuelle) et la possibilité de les utiliser à l'avenir, que ce soit pour le divertissement, la formation ou encore la santé.

4.6 Limitations

Cette étude comporte certaines limitations qu'il nous semble important de considérer. La première étant les limitations techniques imposées par le *Mio LINK*[®] et plus spécifiquement sa portée. Cela nous a forcé à ajouter un câble supplémentaire à notre système, ce qui a « *dérangé [certains participants] durant l'expérience* ». Lorsque nous avons conçu notre expérience, nous avons choisi d'enregistrer le rythme cardiaque à chaque passation, avec et sans *biofeedback*, pour tester la robustesse de notre système. Cependant il aurait été intéressant d'équiper les participants du bracelet uniquement lors de la passation avec la physiologie, pour comparer comment cela changeait la sensation de confort entre les deux conditions.

Nous n'avons pas équipé les participants avec d'autres capteurs qui auraient pu nous aider à identifier les potentielles erreurs du *Mio LINK*[®], car ses équipements supplémentaires auraient modifié notre analyse du confort et de l'encombrement. Nous pouvons aussi mettre en avant le relatif manque de nouveauté perçue lors de l'ajout du *wearable*, qui semble être limitée par l'effet toujours très fort de la réalité virtuelle. Cela tend à déclencher moins d'intérêt envers le *biofeedback* que ce que nous avons prévu. Certains participants étaient davantage concentrés sur l'expérience de réalité virtuelle et ne faisaient pas attention à l'addition de la physiologie. Ces résultats peuvent aussi être liés au design général du jeu et aux effets peut-être trop légers de la boucle de *biofeedback*. En utilisant le bracelet Mio, qui calcule une estimation du nombre de battements par minute, il est seulement possible de faire une analyse unidimensionnelle des émotions. Cela ne nous permet pas une analyse profonde des émotions du joueur, car nous ne pouvons détecter que la seule émotion que l'expérience est conçue pour induire, que ce soit la peur, la joie ou l'ennui. De manière marginale, un participant a rapporté être complètement désensibilisé aux jeux d'horreur, ce que nous avons pu vérifier dans ses relevés physiologiques. Ce participant a même suggéré d'intégrer l'inverse de notre mécanique : « *si vous détectez que je ne réagis pas, alors lancez un « jump-scare » pour forcer une réaction de ma part et m'engager dans l'expérience* ». Cela est similaire à certains types de *game design* proposés par Gilleade *et al.* [2005].

Enfin, lorsque nous avons conçu cette expérience, nous avons choisi de ne pas enregistrer de données concernant l'engagement après la seconde passation pour éviter tout biais potentiel. Il serait intéressant de conduire des séries de pré-expériences et de tests pour mesurer l'effet d'habituation. En effet, nous avons noté que les participants ressentaient toujours le sentiment de peur lors de la seconde passation, malgré leur connaissance de l'expérience. Si l'effet d'habituation n'est pas trop élevé, il serait alors possible d'avoir des retours utilisateurs non biaisés après la seconde passation et ainsi de comparer les résultats de manière intra-groupe.

Chapitre 5

Expérimentation 2.1 : quantifier le contrôle volontaire du rythme cardiaque

Sommaire

5.1	Résumé	94
5.2	Objectif et activité proposée	95
5.3	Matériel et méthodes	96
5.3.1	Système	96
5.3.2	Étude utilisateur	96
5.3.3	Variables et mesures	98
5.4	Résultats	100
5.5	Discussion	101

5.1 Résumé

Ce chapitre présente la première partie de la seconde étude que nous avons menée dans le cadre de cette thèse. L'objectif de cette étude était de comprendre les effets d'une mécanique d'interaction par le contrôle physiologique volontaire sur l'expérience utilisateur en réalité virtuelle. Ainsi, nous avons besoin dans un premier temps de quantifier le niveau de contrôle cardiaque des participants, avant de pouvoir tenir compte de cette compétence dans la composition des panels et dans l'analyse des résultats de la seconde partie de cette étude, c'est-à-dire l'expérience de réalité virtuelle. Par conséquent, nous avons mis en place une procédure, composée d'une série d'exercices de contrôle volontaire du rythme cardiaque, nous permettant de vérifier quelles étaient les valeurs de contrôle cardiaque atteignables par les participants sur une durée prolongée. Nous avons obtenu une distribution normale de la capacité au contrôle cardiaque, mesurée par un temps dans la zone cible. À partir de celle-ci, nous avons mis en place une classification de nos participants en quatre groupes allant d'un faible niveau de contrôle jusqu'à un niveau de contrôle élevé.

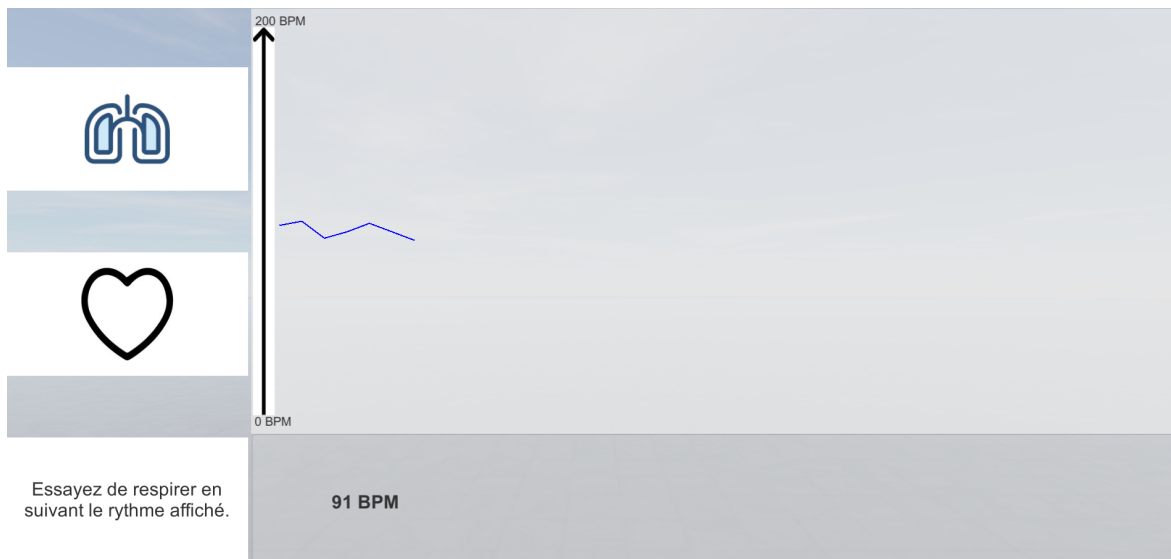


FIGURE 5.1 – Illustration de l'application utilisée pour la de quantification du contrôle cardiaque, seconde phase : respiration et accommodation.

5.2 Objectif et activité proposée

Les résultats de notre première étude, présentés dans le chapitre 4, ont montré l'intérêt de l'utilisation du *biofeedback* pour augmenter l'engagement en réalité virtuelle, lorsque celui-ci était pleinement pris en compte par l'utilisateur lors de son expérience. C'est pourquoi nous avons décidé de proposer une expérience virtuelle augmentée par physiologie durant laquelle le contrôle cardiaque est obligatoire pour la complétion de la tâche. Ainsi, nous avons mis en place une expérimentation en deux parties : une première nous permettant de mesurer le niveau de contrôle cardiaque de nos participants et la seconde plongeant un panel de participants sélectionnés en fonction de leur compétence dans un environnement virtuel immersif augmenté par physiologie.

Comme démontré dans notre revue de littérature et dans notre première étude, il est possible de contrôler son rythme cardiaque. Une modulation de l'activité respiratoire ayant démontré son influence sur l'activité cardiaque, comme nous l'avons observé dans notre première étude et comme rapporté par Sroufe [1971], Clynes [1960] et Westcott et Huttenlocher [1961]. De plus, Sroufe précise que la mise en place d'une phase d'entraînement, sous la forme de schéma respiratoire à suivre, aide les participants à acquérir plus rapidement un contrôle de leur activité cardiaque. Larkin *et al.* [1990] démontrent quant à eux l'intérêt de fournir un retour d'informations sur le contrôle cardiaque, pour permettre une meilleure prise en main de cette mécanique.

C'est sur les bases de ces études que nous avons développé une application simple nous servant à quantifier le niveau de compétence en matière de contrôle du rythme cardiaque. Cette application, sur écran, propose une série d'exercices de contrôle. Ces exercices consistent à accélérer la fréquence cardiaque ou à l'abaisser, pendant la plus longue période de temps possible sur une minute et trente secondes. Dans la suite de ce chapitre, nous présenterons les outils utilisés et l'application que nous avons développée. Nous exposerons ensuite le protocole expérimental, ainsi que les variables et les mesures. Enfin, nous détaillerons les résultats obtenus et les discuterons.

5.3 Matériel et méthodes

5.3.1 Système

Les équipements utilisés pour cette expérience étaient un PC de bureau et un bracelet de fréquence cardiaque *Mio LINK*[®], qui permet d'estimer la valeur de la fréquence cardiaque en battements par minute (BPM).

L'application consiste en un écran simple qui affiche toutes les informations dont les participants ont besoin (voir la figure 5.2) :

- En bas à gauche de l'écran, les instructions qu'ils doivent suivre (ex. « *Accélérez votre rythme cardiaque* », « *Ralentissez votre rythme cardiaque* », ...).
- Au centre de l'écran, une courbe de l'évolution en temps réel de leur fréquence cardiaque et les différents niveaux de fréquence qu'ils doivent atteindre. Ces niveaux de fréquence sont représentés sous forme de zone verte dans le graphique.
- En bas de l'écran, la valeur actuelle de leur fréquence cardiaque.

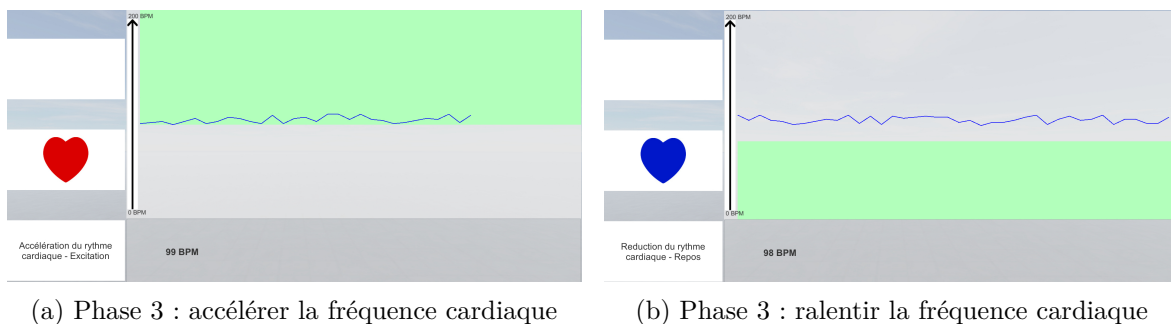


FIGURE 5.2 – Illustrations de l'application mise en place pour la quantification du contrôle cardiaque.

5.3.2 Étude utilisateur

Tout d'abord, nous avons demandé aux participants de lire un formulaire de consentement, un second formulaire leur demandait s'ils n'avaient pas de problèmes cardiaques et s'ils acceptaient que leurs données physiologiques soient enregistrées et utilisées dans une série d'expériences. Ils sont informés qu'ils peuvent mettre un terme à l'expérimentation à tout moment s'ils ressentent une gêne quelconque. S'ils acceptaient et signaient les formulaires, nous les faisons passer un questionnaire pré-expérimental. Ce questionnaire nous a permis de récupérer des informations sur leur sexe, leur âge, leur pratique sportive et leur niveau de condition physique estimé.

Nous expliquons ensuite aux participants les différentes phases de l'expérience et leurs objectifs respectifs, puis nous répondons aux questions qu'ils pourraient avoir. Nous précisons aux participants qu'ils étaient libres d'influer sur leur activité cardiaque de la manière qu'ils souhaitent. Nous équipions ensuite les participants avec le *Mio LINK*[®] et un casque audio, puis nous lançons l'application.

L'application est divisée en trois parties. La première est un écran affichant uniquement un message qui informe les participants que la calibration de leur fréquence cardiaque de référence est en cours. Pour déterminer la fréquence cardiaque de référence de l'utilisateur, nous avons basé notre protocole sur les travaux de Nogueira *et al.* [2016] et Dekker et Champion [2007], déjà utilisés lors de la première expérimentation. Pendant une période de 2 minutes et 30 secondes, l'application enregistre 150 valeurs captées par le bracelet (une estimation du nombre de battements par minute), pendant que les participants écoutent la musique « *Union's Weightless* ». Les participants restent debout pendant ce temps. Une valeur moyenne de ces 150 enregistrements est ensuite calculée pour déterminer la fréquence cardiaque de référence du participant.

Une fois la calibration terminée, l'application passe au deuxième écran qui affiche, à gauche, différents schémas respiratoires que les participants doivent suivre (un schéma respiratoire rapide et peu profond et un schéma respiratoire lent et profond, voir la figure 5.1). Ces schémas sont représentés à l'écran par une icône de poumon qui grandit et rétrécit en suivant des rythmes définis. Le but de cette phase est de permettre aux participants d'observer les effets de ces schémas sur leur fréquence cardiaque. Cette phase est inspirée des travaux de Sroufe [1971] et dure 2 minutes. Elle permet aux participants de se familiariser avec l'interface de l'application. De plus, elle leur donne des informations utiles concernant le contrôle cardiaque *via* la modification de l'activité respiratoire.

Après cette phase d'apprentissage, l'expérience commence. Elle consiste en une série de 8 exercices durant lesquels les participants doivent soit augmenter leur fréquence cardiaque (voir la figure 5.2a), soit l'abaisser (voir la figure 5.2b). Ce design expérimental s'inspire des travaux de Manuck *et al.* [1975]. Chaque exercice dure 1 minute et 30 secondes. Entre chaque exercice, il y a une période de repos de 45 secondes. Pendant la phase de repos, un chronomètre est affiché pour permettre aux participants d'anticiper le début d'un nouvel exercice. En raison du potentiel effet stressant de la minuterie, celle-ci n'est pas affichée pendant les exercices. La succession d'exercices est aléatoire, cependant, au cours de l'expérimentation, la répétition d'un même type d'exercice (accélérer la fréquence cardiaque ou ralentir la fréquence cardiaque) ne peut se produire qu'une seule fois. Pendant un exercice, les participants doivent

maintenir leur fréquence cardiaque dans la zone cible (représentée en vert sur l'écran) pendant une durée maximale sur une période d'une minute trente.

Après chaque type d'exercice, la difficulté augmente. Ceci nous permet d'évaluer un niveau acceptable de difficulté par rapport à la capacité de contrôle de la fréquence cardiaque que chaque participant peut atteindre. Cela permet également d'évaluer finement le niveau de maîtrise de chaque participant.

Pour l'accélération de la fréquence cardiaque, il faut atteindre au minimum les paliers suivants :

- Valeur calibrée + 20 BPM.
- Valeur calibrée + 25 BPM.
- Valeur calibrée + 30 BPM.
- Valeur calibrée + 35 BPM.

Pour le ralentissement de la fréquence cardiaque, il faut atteindre au maximum les paliers suivants :

- Valeur calibrée + 5 BPM.
- Valeur calibrée.
- Valeur calibrée - 5 BPM.
- Valeur calibrée - 10 BPM.

Une fois l'expérience terminée, les participants répondent à un questionnaire post-expérimentation. Ce questionnaire nous permet d'obtenir le ressenti des participants sur leur propre contrôle cardiaque et la manière dont ils ont choisi d'influer sur leur activité cardiaque.

5.3.3 Variables et mesures

Pour évaluer la compétence des participants à contrôler leur fréquence cardiaque, nous avons enregistré leur rythme cardiaque pendant l'expérience ainsi que le temps qu'ils ont passé dans la zone cible pendant chaque exercice.

Avant l'expérience, les participants répondent à un court questionnaire sur leur âge, leur sexe, leur niveau de condition physique et la fréquence à laquelle ils font de l'exercice. Après l'expérience, nous leur demandons dans quelle mesure ils se sentent capables de contrôler leur propre fréquence cardiaque, son accélération et sa décélération.

Nous avons recruté 58 participants pour cette expérience (14 femmes et 44 hommes) âgés de 21 à 44 ans ($M = 25,58$, $ET = 5,628$). Nous avons dû retirer un participant de notre panel en raison d'un problème technique lié au bracelet durant l'expérience.

5.4 Résultats

Pour mesurer les résultats des participants dans les différentes conditions, nous avons calculé le temps moyen qu'ils ont passé dans la zone cible de fréquence cardiaque pour chaque niveau de difficulté des exercices. Le test Shapiro-Wilk montre que le temps moyen dans la zone cible suit une distribution normale ($p = 0,207$, voir la figure 5.3).

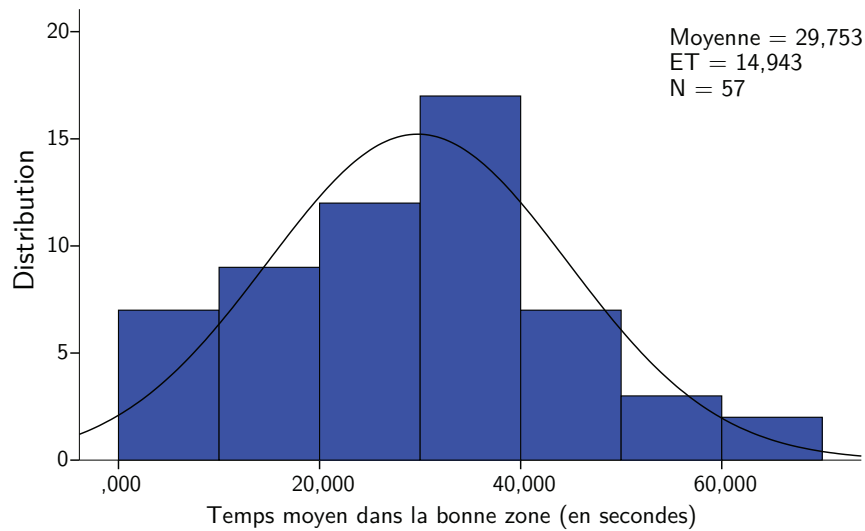


FIGURE 5.3 – Distribution du temps moyen passé dans la zone cible durant l'expérience par les participants.

Après avoir observé les résultats pour les différents niveaux de difficulté, nous avons observé qu'au-delà du second niveau, les participants avaient beaucoup plus de difficultés à contrôler leur rythme cardiaque. Ainsi, nous avons calculé les différents quartiles du temps moyen dans la zone cible pour le premier et second niveau de difficulté pour l'« accélération de la fréquence cardiaque » et pour le « ralentissement de la fréquence cardiaque ». Cela nous permet d'estimer une fourchette de temps acceptable et de commencer la classification des participants. Les différents intervalles de temps définis par ces quartiles sont :

- pour l'accélération de la fréquence cardiaque : [0 ; 19 [secondes, [19 ; 37 [secondes, [37 ; 62 [secondes et [62 ; 90] secondes.
- pour le ralentissement de la fréquence cardiaque : [0 ; 19 [secondes, [19 ; 32 [secondes, [32 ; 48 [secondes et [48 ; 90] secondes.

Sur la base de ces fourchettes de temps, nous avons considéré que les participants du panel n'ayant pas réussi à atteindre au moins la moitié du temps du premier quartile (c'est-à-dire 10 secondes de moyenne dans la zone cible de fréquence cardiaque) n'étaient pas en capacité

de contrôler leur rythme cardiaque, soit 21 participants. Ainsi, à partir du panel de 36 sujets considérés capables de contrôler leur rythme cardiaque, nous avons recalculé de nouveaux quartiles, pour une meilleure classification de leur capacité. Nous avons obtenu les quartiles de temps moyens suivants :

- pour l'accélération de la fréquence cardiaque : [12,5 ; 29 [secondes, [29 ; 48 [secondes, [48 ; 65,5 [secondes et [65,5 ; 90] secondes.
- pour le ralentissement de la fréquence cardiaque : [12,5 ; 28 [secondes, [28 ; 36 [secondes, [36 ; 50 [secondes et [50 ; 90] secondes.

Ces quartiles nous permettent de classer les participants dans des catégories allant de 1 (faible) à 4 (exceptionnel) pour chaque type d'exercice. À partir de ces deux notes, nous calculons une valeur moyenne pour obtenir un résultat global sur leur capacité générale à contrôler leur fréquence cardiaque, aussi bien dans l'accélération que dans le ralentissement. Nous avons ainsi, pour les 57 participants, la répartition suivante :

- 21 n'ayant pas réussi à contrôler leur fréquence cardiaque (9 n'ont pas réussi à accélérer leur fréquence, 11 n'ont pas réussi à ralentir leur fréquence et un n'a réussi aucun des exercices).
- 2 sont considérés comme faiblement capables de contrôler leur fréquence cardiaque.
- 13 sont considérés comme moyennement capables de contrôler leur fréquence cardiaque.
- 13 sont considérés comme fortement capables de contrôler leur fréquence cardiaque.
- 8 sont considérés comme exceptionnels dans le contrôle de leur fréquence cardiaque.

5.5 Discussion

L'objectif de cette première partie de notre expérimentation était de quantifier à quel point les participants sont capables d'influencer leur propre fréquence cardiaque. À partir de nos résultats, nous avons été en mesure de déterminer des limites acceptables de contrôle cardiaque (qui permettent aux participants de réussir à contrôler leur fréquence cardiaque) et de classer les participants par niveau de compétence. De plus, la distribution normale du temps moyen passé dans la zone cible de fréquence cardiaque pourrait nous permettre de répliquer cette procédure sur un panel plus large et de proposer ainsi une échelle de compétence du contrôle cardiaque, dans laquelle il serait possible de placer tout utilisateur.

Chapitre 6

Expérimentation 2.2 : contrôle volontaire de la fréquence cardiaque dans une expérience de réalité virtuelle

Sommaire

6.1	Résumé	104
6.2	Objectif et activité proposée	105
6.3	Matériel et méthodes	107
6.3.1	Appareillage	107
6.3.2	Influence des données physiologiques	107
6.3.3	Jeu en réalité virtuelle	108
6.3.4	Participants	111
6.3.5	Variables et mesures	112
6.3.6	Procédure expérimentale	115
6.3.7	Hypothèses	115
6.4	Résultats	116
6.4.1	Utilisabilité perçue	116
6.4.2	Implication ressentie	117
6.4.3	Gratification Personnelle	118
6.4.4	Concentration	119
6.4.5	Agentivité	120
6.4.6	Résultats objectifs	121
6.5	Discussion	122
6.6	Discussion générale	125
6.7	Limitations	127

6.1 Résumé

L'utilisation du *biofeedback* en réalité virtuelle semble prometteuse pour proposer des expériences pleinement immersives. La grande majorité des travaux s'intéressent au *biofeedback* comme mécanique d'interaction supplémentaire et nous souhaitons étudier son impact sur l'expérience utilisateur lorsqu'elle est obligatoire pour compléter une expérience, en particulier lors d'un jeu. Dans la partie précédente de cette étude, nous avons créé un protocole pour évaluer la compétence des participants en matière de contrôle de leur fréquence cardiaque. Dans cette seconde partie, nous les immergeons dans une expérience de réalité virtuelle, dans laquelle ils devront obligatoirement maîtriser leur rythme cardiaque pour réussir le jeu. Nous avons observé des résultats cohérents entre notre échelle de compétences et la maîtrise par les participants de la mécanique de jeu physiologique dans l'expérience de réalité virtuelle. Nous avons également constaté que la mécanique de *biofeedback* était fortement engageante et qu'elle induisait un fort sentiment d'agentivité, conduisant à l'idée que le *biofeedback* pouvait améliorer le sentiment de présence.

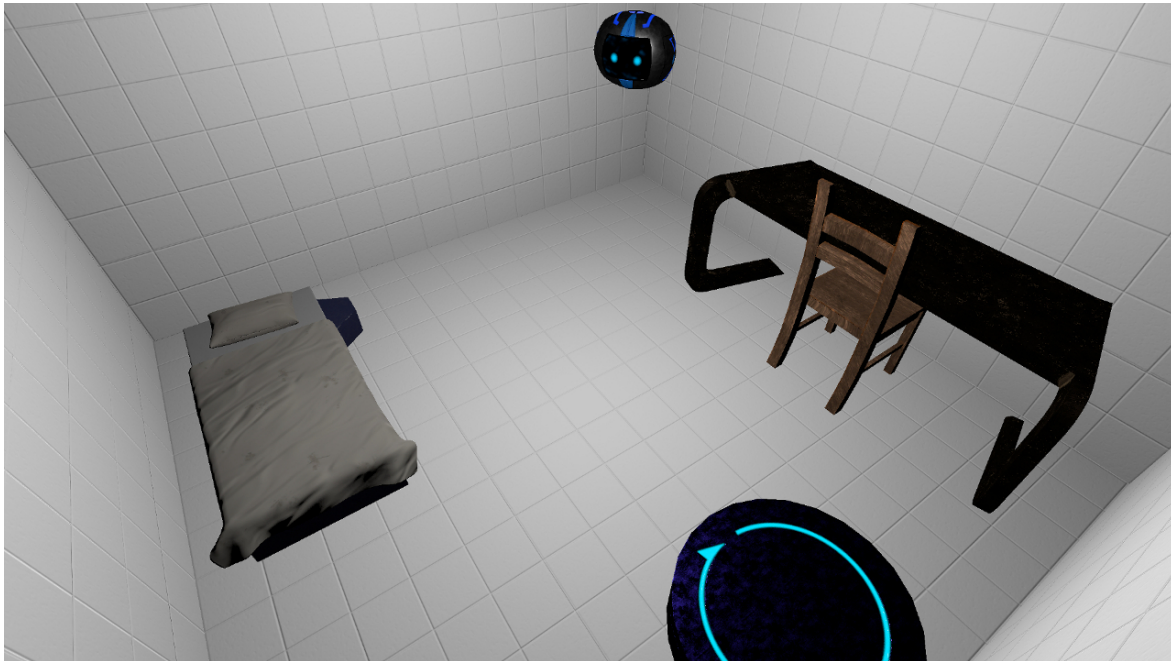


FIGURE 6.1 – Illustration de l'environnement virtuel mis en place pour la réalisation de la deuxième expérimentation, concernant l'utilisation d'un *biofeedback* cardiaque comme mécanique d'interaction obligatoire.

6.2 Objectif et activité proposée

Ce chapitre présente la deuxième partie de l'expérimentation qui a été présentée dans le chapitre 5, qui vise l'étude du contrôle volontaire obligatoire de l'activité cardiaque comme une mécanique d'interaction dans un environnement virtuel immersif.

L'objectif de cette expérimentation est d'étudier les effets de cette nouvelle mécanique d'interaction sur l'expérience utilisateur, notamment sur l'engagement et le sentiment d'agentivité. En effet, comme nous l'avons montré dans notre revue de littérature, plusieurs études ont permis de déterminer l'intérêt de l'utilisation de ce type de mécanique dans le cadre d'expériences de réalité virtuelle [Prpa *et al.*, 2018; Salminen *et al.*, 2018; Weerdmeester *et al.*, 2017]. Nous avons déjà examiné le bénéfice de l'utilisation du *biofeedback* pour l'augmentation de l'engagement dans notre première étude (chapitre 4), nous souhaitons dans cette expérience investiguer son effet sur le sentiment d'agentivité (voir figure 6.2). En effet, comme l'indique Bandura [1982], la capacité à réguler son activité physiologique passe par les mêmes mécanismes que l'agentivité personnelle. Ainsi, l'utilisation de mécaniques d'interaction passant par un contrôle volontaire de l'activité cardiaque aurait un effet sur le sentiment d'agentivité.

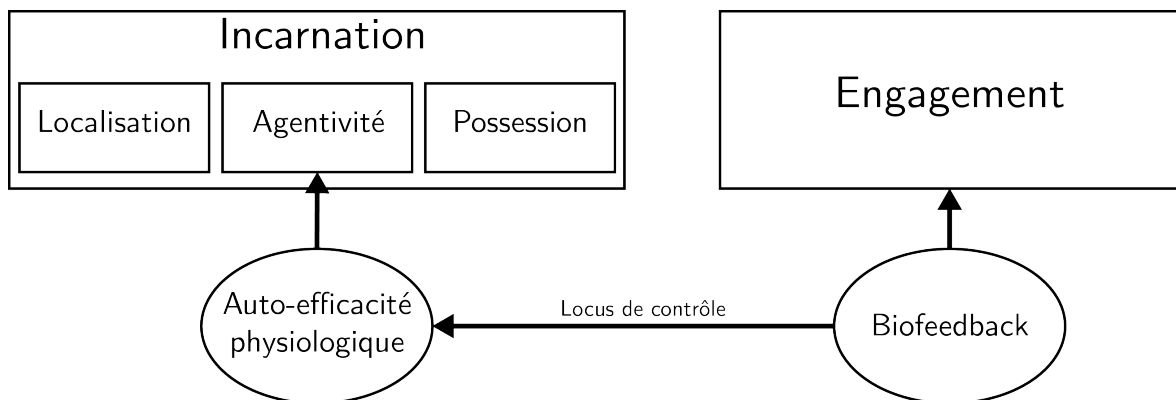


FIGURE 6.2 – Illustration des intrications entre le *biofeedback* et les sentiments d'agentivité, d'auto-efficacité physiologique et d'engagement

En suivant un modèle similaire à celui de la première partie de cette étude (une série de 8 épreuves durant lesquelles il faut faire soit monter soit baisser son rythme cardiaque), nous avons développé un jeu de réalité virtuelle immersive qui utilisera la fréquence cardiaque des participants comme une mécanique de jeu. Ce jeu est composé d'une série de 8 niveaux proposant aux participants des exercices de contrôle de leur fréquence cardiaque. Pour étudier les effets de cette mécanique de *biofeedback* sur l'engagement et le sentiment d'agentivité, nous proposons deux versions du jeu, une avec un niveau de difficulté moyen et une avec

une difficulté élevée. Nous nous appuyons sur un design expérimental nous permettant de comparer les effets du niveau de compétence des participants, identifié lors de la première partie de cette étude, et de la difficulté sur les facteurs retenus de l'expérience utilisateur. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons le matériel que nous avons utilisé et décrivons le jeu en réalité virtuelle que nous avons développé pour cette expérimentation. Puis nous présentons les participants sélectionnés pour cette étude, d'après les résultats de l'étude présentée dans le chapitre 5, ainsi que les variables et mesures, la procédure expérimentale et les hypothèses que nous nous proposons d'éprouver. Enfin, nous présentons les résultats obtenus à la suite de cette expérience et nous terminons par une discussion sur l'expérience virtuelle et une discussion générale sur les deux expériences de cette étude.

6.3 Matériel et méthodes

6.3.1 Appareillage

Les équipements utilisés pour cette expérience sont : un système de réalité virtuelle HTC Vive, un ordinateur de bureau (composé d'un processeur *Intel Core I7-6700HQ*[®] @ 2,60 GHz et d'une carte graphique *Nvidia Geforce GTX 1080*[®]), un bracelet cardiaque *Mio LINK*[®] et un casque audio. L'espace de navigation est de 3 mètres sur 3 mètres.

6.3.2 Influence des données physiologiques

Les participants déverrouillent la fin de chaque niveau pour passer au suivant en atteignant certaines valeurs de fréquence cardiaque pendant un temps défini. D'après les résultats de la première phase de cette étude, présentés dans le chapitre précédent, nous avons choisi les seuils de fréquence cardiaque suivants :

- Lors de la réduction de la fréquence cardiaque, il faut atteindre la valeur de calibration, ou moins.
- Lors de l'accélération de la fréquence cardiaque, il faut atteindre la valeur de calibration plus 20 BPM, ou plus.

Nous avons choisi la valeur « accélération » inférieure aux 25 BPM précédemment considérés afin de proposer une expérience accessible minimisant la potentielle frustration. En effet, un *biofeedback* cardiaque obligatoire est une nouvelle mécanique d'interaction qui peut s'avérer difficile à s'approprier [Larkin *et al.*, 1990], comme nous l'avons constaté dans notre première expérimentation, présentée dans le chapitre 4.

Pour donner un retour d'information aux participants sur leur fréquence cardiaque, chacun des 8 niveaux proposés possède une interaction spécifique. Les différentes interactions sont décrites dans la section suivante. Pour induire un sentiment d'agentivité, nous voulions lier l'effet de la fréquence cardiaque à une conséquence « logique » dans l'environnement virtuel (e.g., plus la fréquence cardiaque est élevée, plus le feu est grand, plus la fréquence cardiaque est faible, plus la gravité se réduit...). En effet, Groenegrass *et al.* [2010] démontrent qu'ancrer les données physiologiques dans l'environnement virtuel permet d'augmenter la relation entre ce dernier et l'utilisateur.

6.3.3 Jeu en réalité virtuelle

Pour ce faire, nous avons développé un jeu inspiré de *Portal*¹. Le jeu prend place dans un laboratoire expérimental futuriste, il consiste en une succession de salles qui possèdent chacune leur interaction. Le jeu débute dans une salle meublée, avec un drône flottant dans un des coins de la pièce (voir la figure 6.1). Afin d'adapter à chaque participant la mécanique de *biofeedback* obligatoire, nous commençons chaque passation par une phase de calibration, la même que celle présentée dans l'étude du chapitre précédent. Contrairement à celle-ci, la calibration a lieu dans la salle de départ, dans l'environnement en réalité virtuelle. Durant cette phase de calibration, les participants peuvent explorer librement la salle mais sont toutefois invités à ne pas être trop actifs, afin de ne pas faire augmenter leur fréquence cardiaque. Une fois la calibration terminée, le drone explique le contexte du jeu et donne les instructions aux participants.

Les participants changent de salle en accédant à un téléporteur qui s'active une fois le défi de la salle terminé. Lorsque les participants atteignent la fin d'une salle, ils sont téléportés dans une dans une salle vide, ressemblant à un ascenseur, avec de la musique d'ambiance. Ils attendent dans cet pièce pendant 30 secondes avant d'avoir accès à la salle suivante, *via* un téléporteur. Cette salle permet aux participants de retrouver un rythme cardiaque normal avant de débiter l'épreuve suivante. Les différentes salles présentes dans le jeu sont :

- **Salle A, augmentation** (voir la figure 6.3a) : la salle est plongée dans l'obscurité et des pointes recouvrent partiellement le sol. Des projecteurs sur les murs s'illuminent progressivement, et indiquent un passage sûr vers le téléporteur, lorsque la fréquence cardiaque dépasse le seuil demandé.
- **Salle B, réduction** (voir la figure 6.3b) : les murs de la pièces projettent des lasers qui bloquent le passage vers le téléporteur. Les lasers deviennent partiellement transparents lorsque la fréquence cardiaque est inférieure au seuil, puis ils se désactivent pour laisser le passage libre, au bout du temps déterminé par le niveau de difficulté.
- **Salle C, réduction** (voir la figure 6.3c) : la pièce est coupée en deux par une porte et le joueur est équipé d'un pistolet. Une fois que la fréquence cardiaque du participant est restée sous le seuil pendant la durée déterminée par le niveau de difficulté, le pistolet s'active et le participant peut tirer sur la porte jusqu'à ce qu'elle s'ouvre.
- **Salle D, augmentation** (voir la figure 6.3d) : la pièce contient un brasero. L'objectif est de faire grandir les flammes jusqu'à ce que le téléporteur soit actif. Le feu grandit tant que la fréquence cardiaque est au-dessus du seuil.

1. Valve Corporation - 2007

- **Salle E, réduction** (voir la figure 6.3e) : la pièce est remplie de gaz et le téléporteur ne s'active qu'une fois le gaz évacué. La quantité de gaz diminue si la fréquence cardiaque est inférieure au seuil.
- **Salle F, augmentation** (voir la figure 6.3f) : la partie du sol de la pièce, située entre le joueur et le téléporteur, est électrifiée. Un pont se déplace progressivement pour permettre au joueur de traverser la salle. Tant que la fréquence cardiaque est au-dessus du seuil, le pont s'approche de la plate-forme de départ jusqu'à ce que les deux côtés soient reliés.
- **Salle G, réduction** (voir la figure 6.3g) : la pièce est séparée en deux par une pile de cubes qui ne peuvent être déplacés. L'objectif est de nullifier la gravité afin de permettre aux cubes de flotter et donc de libérer le passage vers l'autre côté de la salle. Cela est possible lorsque la fréquence cardiaque est restée sous le seuil pendant une durée suffisante.
- **Salle H, augmentation** (voir la figure 6.3h) : la pièce est séparée en deux par un mur. L'objectif est de briser le mur afin de permettre le passage vers l'autre côté de la salle. Cela est possible lorsque la fréquence cardiaque est restée au dessus du seuil pendant une durée suffisante.

Au début de chaque salle, l'instruction spécifique correspondant à celle-ci est donnée au participant : « Dans cette salle, pour atteindre la sortie : veuillez augmenter votre rythme cardiaque » ou « Dans cette salle, pour atteindre la sortie : veuillez baisser votre rythme cardiaque ». Durant chaque défi, il est affiché au joueur sa fréquence cardiaque actuelle et celle qu'il doit atteindre. Une fois que le joueur est dans la bonne zone de fréquence cardiaque, le mécanisme de la pièce dans laquelle il se trouve s'active progressivement. Les participants doivent être dans la bonne zone pendant un temps défini (voir la section 6.3.5) afin d'activer complètement les mécanismes et le téléporteur pour terminer le niveau. Pour chaque salle, ils disposent d'un maximum de 1 minute et 30 secondes pour atteindre la sortie. S'ils ne terminent pas à temps, ils sont automatiquement téléportés dans la chambre de transition (ascenseur). L'ordre d'enchaînement des salles est arrangé complètement aléatoirement au lancement du jeu. Après avoir terminé les 8 salles proposées, les participants sont téléportés dans la salle de départ et le jeu prend fin.

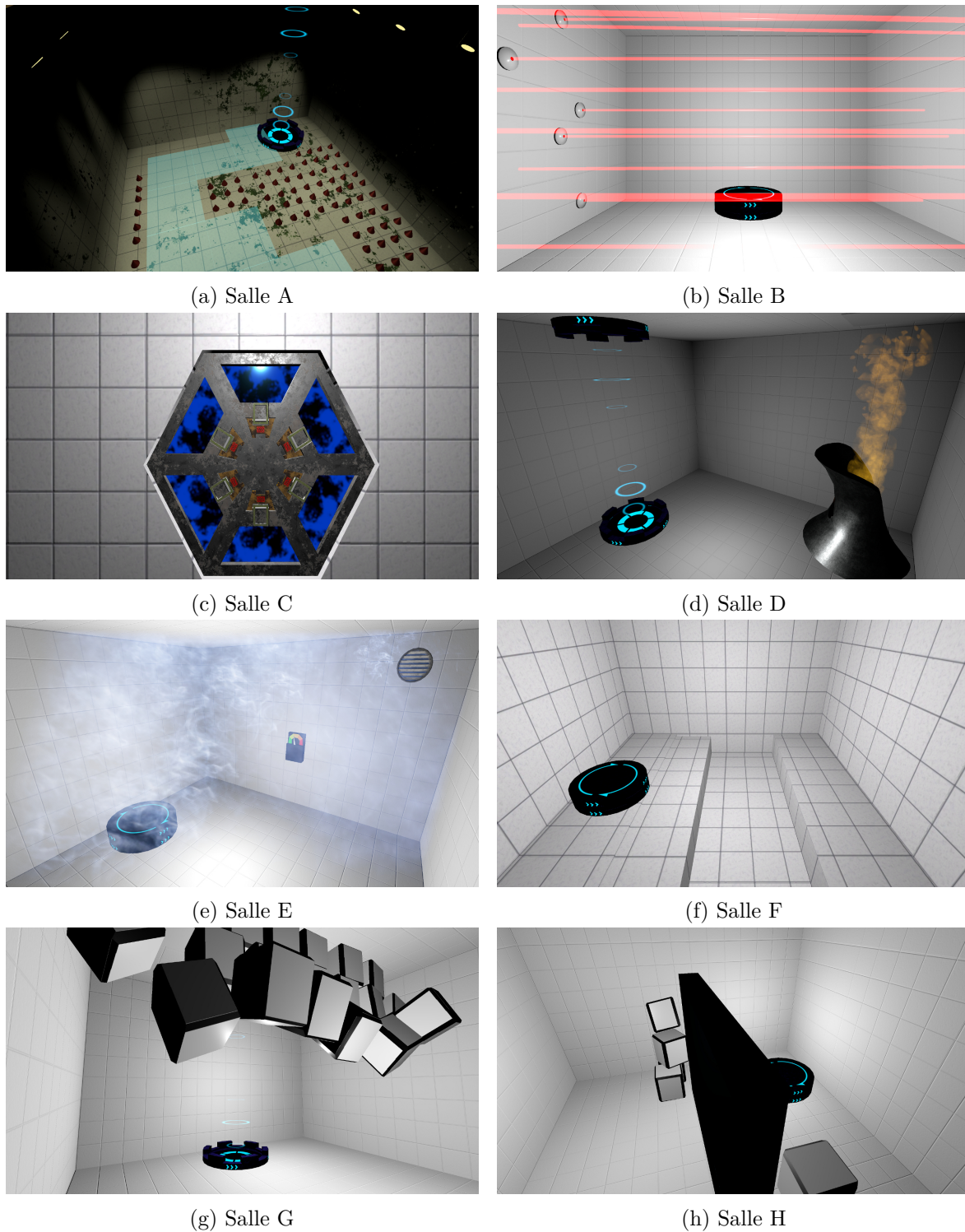


FIGURE 6.3 – Images des différentes salles du jeu en réalité virtuelle développé pour la seconde étude.

6.3.4 Participants

Parmi les 57 participants du panel de l'expérience précédente, nous en avons retenu 30 pour réaliser la deuxième partie de l'expérience (se référer à la section 5.4). Ce panel se compose de 8 femmes et 22 hommes, âgés de 21 à 43 ans ($M = 25,87$, $ET = 5,237$). Nous avons choisi ce panel en fonction de la disponibilité des participants et de leur niveau de compétence dans le contrôle de leur fréquence cardiaque. D'après la classification issue de l'étude précédente nous avons :

- 8 participants qui n'ont pas réussi à contrôler leur fréquence cardiaque dont
 - 5 qui n'ont pas réussi à ralentir leur fréquence cardiaque durant les exercices.
 - 3 qui n'ont pas réussi à accélérer leur fréquence cardiaque durant les exercices.
- 8 participants qui sont considérés comme moyennement capables de contrôler leur fréquence cardiaque.
- 8 participants sont considérés comme fortement capables de contrôler leur fréquence cardiaque.
- 6 participants qui sont considérés comme exceptionnels dans le contrôle de leur fréquence cardiaque.

Pour effectuer notre analyse, nous avons divisé les participants en deux groupes principaux :

- le groupe « *low control* » (*LCG*), composé des 8 participants qui n'ont pas réussi et des 8 participants qui sont considérés comme moyennement capables de contrôler leur fréquence cardiaque.
- le groupe « *high control* » (*HCG*), composé des 8 participants qui sont considérés comme fortement capables de contrôler leur fréquence cardiaque et les 6 qui sont considérés exceptionnels dans le contrôle de leur fréquence cardiaque.

Notre panel était expérimenté en réalité virtuelle, en effet, à la question « Quelle est votre expérience de la réalité virtuelle ? » (1 = « Je n'ai jamais utilisé de systèmes de réalité virtuelle », 5 = « C'est mon outil de travail »), le score moyen était de 4,63 ($ET = 0,669$). Nous avons délibérément choisi des participants expérimentés en réalité virtuelle afin d'éviter qu'ils ne se concentrent davantage sur la découverte de la technologie plutôt que sur l'expérience du jeu.

6.3.5 Variables et mesures

Le niveau de compétence est au centre de notre étude, c'est pourquoi nous avons développé deux versions de notre jeu, avec deux niveaux de difficulté différents. Chaque participant teste successivement les deux versions du jeu. Le niveau de difficulté et le niveau de compétence sont ainsi utilisés comme variables indépendantes :

- Niveau de difficulté :
 - Difficulté normale (ND) : le participant doit maintenir sa fréquence cardiaque dans la bonne zone durant 10 secondes (cumulées) pour débloquer le téléporteur de la salle.
 - Difficulté élevée (ED) : le participants doit maintenir sa fréquence cardiaque dans la bonne zone durant 20 secondes (cumulées) pour débloquer le téléporteur de la salle.
- Niveau de compétence :
 - Groupe faible contrôle (LCG) : les participants n'ayant pas réussi à contrôler leur fréquence cardiaque ou qui étaient considérés moyennement capables de contrôler leur fréquence cardiaque.
 - Groupe haut contrôle (HGC) : les participants étant considérés comme fortement capables de contrôler leur fréquence cardiaque ou exceptionnels dans le contrôle de leur fréquence cardiaque.

L'ajustement automatique de la difficulté dans des jeux avec *biofeedback* a déjà été étudié de plusieurs manières. Stach *et al.* [2009] proposent un système ajustant automatiquement la difficulté de la tâche de contrôle cardiaque en temps réel si les participants rencontrent des difficultés pour atteindre les objectifs. Si leur système semble intéressant il ne correspond pas à notre objectif, le contrôle cardiaque étant l'unique mécanique d'interaction, il ne nous paraît pas adapté pour pleinement observer des différences entre nos deux groupes de compétences. D'autre part, Wollmann *et al.* [2016] proposent différents niveaux de difficultés en ajoutant des tâches supplémentaires (contrôles virtuels et une mécanique de collection de pièces comptant dans le calcul dans score de performance). Étant donnée que nous souhaitons analyser l'influence de notre mécanique de contrôle volontaire de l'activité cardiaque, nous concluons qu'ajouter des mécaniques d'interactions supplémentaires pourrait potentiellement affecter les joueurs de différentes manières que nous ne sommes pas en mesure d'anticiper. C'est pourquoi nous choisissons de proposer deux modes de difficultés affectant uniquement la mécanique de contrôle cardiaque. En nous reposant sur les résultats de la première partie

de cette étude (Chapitre 5) nous concluons qu’une difficulté affectant les périodes de temps est appropriée. De plus, les périodes de temps sont définies grâce aux résultats précédents.

Afin de recueillir un retour des participants sur l’expérience, nous avons construit un questionnaire basé sur de multiples questionnaires pertinents présents dans la littérature. Concernant l’engagement, nous avons étudié le *Presence Questionnaire* de Witmer et Singer [1998], le *User Engagement Scale (UES)* de Wiebe *et al.* [2014] ainsi que le *Game User Experience Satisfaction Scale (GUESS)* de Phan *et al.* [2016]. De ces questionnaires, nous avons sélectionné les sous-métriques pertinentes à notre étude : l’utilisabilité perçue, l’implication ressentie, la satisfaction personnelle et la concentration. Concernant les questions sur l’agentivité, nous avons étudié les travaux d’Argelaguet *et al.* [2016] et de Gorisse *et al.* [2017] et nous avons reformulé les questions afin de les axer sur l’utilisation de la fréquence cardiaque. Toutes nos questions sont sous la forme d’échelles sémantiques différentielles en 5 points, elles sont présentées dans le tableau 6.1.

Nous avons aussi enregistré les variables objectives suivantes :

- la durée combinée de la complétion des 8 niveaux proposés.
- le nombre de niveaux échoués, sur les 8 proposés.

Nous avons aussi enregistré des données qualitatives basées sur le retour d’expérience des participants (questionnaire et entretiens semi-directifs).

Les participants ont expérimenté successivement, et dans le même ordre, les deux versions du jeu : dans un premier temps la difficulté normale (ND) puis la difficulté élevée (ED). Nous avons décidé de ne pas contrebalancer cette condition, afin de ne pas créer un sentiment de frustration trop élevé chez les participants, sentiment qui aurait pu apparaître en commençant par la condition ED. La courbe d’apprentissage fait également partie du design de notre étude.

CHAPITRE 6. EXPÉRIMENTATION 2.2 : CONTRÔLE VOLONTAIRE
DE LA FRÉQUENCE CARDIAQUE EN RÉALITÉ VIRTUELLE

TABLEAU 6.1 – Questionnaire post-expérience composé de 5 dimensions : Utilisabilité perçue -PU ; Implication ressentie - FI ; Satisfaction personnelle - PG ; Concentration - FA ; Agentivité - AG. *Les résultats de ces questions sont inversés (plus le score est élevé, plus le résultat est positif)

ID	Question
PU1	Dans quelle mesure avez-vous trouvé les mécaniques de jeux confuses à utiliser ?* (UES)
PU2	Dans quelle mesure l'environnement était-il réactif aux actions que vous avez initiées (ou réalisées) ? (UES)
PU3	Dans quelle mesure l'expérience de jeu vous a-t-elle paru exigeante ?* (UES)
PU4	Dans quelle mesure étiez-vous capable de réaliser les tâches que vous deviez effectuer durant le jeu ? (UES)
PU5	Dans quelle mesure avez-vous été vous senti frustré durant le jeu ?* (UES)
PU6	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que les mécaniques de jeux étaient mentalement éprouvantes ?* (UES)
FI1	Dans quelle mesure avez-vous trouvé l'expérience de jeu amusante ? (UES)
FI2	Dans quelle mesure étiez-vous absorbé par les tâches à réaliser dans le jeu ? (UES)
FI3	Dans quelle mesure tous vos sens étaient-ils engagés ? (PQ)
FI4	Dans quelle mesure étiez-vous engagé dans l'expérience en environnement virtuel ? (PQ)
PG1	Dans quelle mesure étiez-vous confiant à propos de votre réussite dans le jeu ? (GUESS)
PG2	Dans quelle mesure avez-vous senti un sentiment d'accomplissement lors de la réussite aux épreuves ? (GUESS)
PG3	Dans quelle mesure avez-vous eu envie de faire de votre mieux pour réussir durant le jeu ? (GUESS)
PG4	Dans quelle mesure étiez-vous concentré sur votre performance durant le jeu ? (GUESS)
PG5	Dans quelle mesure avez-vous senti que le jeu vous motivait constamment à avancer vers le prochain niveau ? (GUESS)
PG6	Dans quelle mesure avez-vous senti que votre niveau de maîtrise augmentait au fur et à mesure de la complétion des épreuves ? (GUESS)
FA1	Dans quelle mesure avez-vous prêté attention au monde autour de vous durant le jeu ? (UES)
FA2	Dans quelle mesure étiez-vous impliqué dans les tâches du jeu au point d'en perdre la notion du temps ? (UES)
FA3	Dans quelle mesure pouviez-vous faire abstraction des distractions extérieures lors du jeu ? (GUESS)
AG1	Dans quelle mesure avez-vous été capable d'interagir avec l'environnement de la manière dont vous souhaitiez ?
AG2	Dans quelle mesure avez-vous trouvé les tâches de contrôle cardiaque difficile à réaliser ?*
AG3	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le contrôle de votre rythme cardiaque vous permettait d'influencer les mécanismes du jeu ?

6.3.6 Procédure expérimentale

Les participants commencent par répondre à un questionnaire de pré-expérimentation, leur demandant leur expérience de la réalité virtuelle, leur sensibilité à la cyber-cinétose et leurs habitudes vidéo-ludiques. Ils sont informés qu'ils peuvent retirer le casque et mettre un terme à l'expérimentation à tout moment s'ils ressentent une gêne quelconque. Nous leur expliquons ensuite qu'ils vont réaliser une expérience reprenant les mêmes mécaniques que la première expérience présentée dans le chapitre précédent, cette fois en environnement immersif. Nous leur expliquons les différentes phases de l'expérience (sans détailler les différentes salles) et comment ils sont censés compléter le jeu. Nous répondons aux éventuelles questions des participants concernant l'expérience s'il leur manque des informations. Nous équipons ensuite les participants avec le bracelet Mio et le casque de réalité virtuelle.

Après avoir complété l'expérience en condition ND, les participants répondent au questionnaire et se préparent à nouveau à réaliser l'expérience, en condition ED. Ils répondent ensuite une seconde fois au questionnaire et nous conduisons un court entretien semi-directif pour recueillir des informations au sujet :

- de leur niveau de motivation personnelle pendant l'expérience en RV par rapport à leur motivation pendant la première expérience de cette étude (sans réalité virtuelle) ;
- du niveau de difficulté préféré qu'ils ont préféré (ND ou ED) ;
- de leur ressenti général sur la difficulté du jeu.

6.3.7 Hypothèses

- **H1** : L'utilisation du *biofeedback* cardiaque directe est une mécanique de jeu engageante.
- **H2** : Le sentiment d'engagement (mesuré au travers de l'utilisabilité perçue, l'implication ressentie, la satisfaction personnelle et de la concentration) est positivement proportionnel au niveau de maîtrise du contrôle de la fréquence cardiaque.
- **H3** : L'utilisation du *biofeedback* cardiaque directe volontaire provoque un fort sentiment d'agentivité, lié au niveau de compétence.

6.4 Résultats

Nous avons analysé nos résultats selon deux angles différents :

- un modèle inter-sujets, comparant les résultats des groupes de compétence ;
- un modèle intra-sujets, comparant les résultats des deux versions du jeu.

Pour évaluer l'interaction entre la compétence et la difficulté sur les réponses au questionnaire, nous utilisons une ANOVA mixte, bien que nos données ne suivent pas une distribution normale selon les résultats du test de Shapiro-Wilk, en raison de la robustesse de l'ANOVA aux erreurs de type 1 [Winer, 1962]. Pour les analyses plus « simples », nous nous baserons sur des tests non-paramétriques : le test de Mann-Whitney pour les comparaisons inter-sujets et le test de Wilcoxon pour les comparaisons intra-sujets.

6.4.1 Utilisabilité perçue

Les résultats de notre ANOVA mixte démontrent qu'il n'y a pas d'interaction significative entre le niveau de difficulté et le niveau de compétence des participants et ce pour toutes les questions concernant l'utilisabilité perçue. De plus, pour les questions PU1, PU2 et PU5 nous n'observons pas d'influence significative ni de la difficulté, ni de la compétence.

Il y a un effet substantiel de la difficulté sur les réponses aux questions PU3 (Lambda de Wilks = 0,644, $F(1, 28) = 15,458$, $p = 0,001$, eta-carré partiel = 0,356), PU4 (Lambda de Wilks = 0,853, $F(1, 28) = 4,816$, $p = 0,037$, eta-carré partiel = 0,147) et PU6 (Lambda de Wilks = 0,841, $F(1, 28) = 5,293$, $p = 0,029$, eta-carré partiel = 0,159). Ces résultats, présentés dans le tableau 6.2, indiquent que l'utilisabilité perçue est meilleure pour le niveau de difficulté normal par rapport au niveau de difficulté élevée.

De plus, nous observons un effet significatif du niveau de compétence des participants pour la question PU6 ($p = 0,01$, eta-carré partiel = 0,215), où le groupe HCG rapporte une meilleure utilisabilité perçue que les participants du groupe LCG.

TABLEAU 6.2 – Résumé statistique des réponses au questionnaire post-expérimentation concernant l'utilisabilité perçue.

		PU3			PU4			PU6		
Groupe	Difficulté	n	M	SD	n	M	SD	n	M	SD
LCG	ND	16	3,44	0,96	16	4,38	0,72	16	4,13	1,26
	ED	16	2,94	0,93	16	3,88	0,89	16	3,56	1,09
HCG	ND	14	3,50	0,86	14	4,50	0,52	14	4,79	0,58
	ED	14	2,71	0,73	14	4,07	1,14	14	4,64	0,63
Total	ND	30	3,47	0,90	30	4,43	0,63	30	4,43	1,04
	ED	30	2,83	0,83	30	3,97	1,00	30	4,07	1,05

6.4.2 Implication ressentie

Les résultats de notre ANOVA mixte démontrent qu'il y a une interaction significative entre le niveau de difficulté et le niveau de compétence des participants uniquement pour la question FI1 (Lambda de Wilks = 0,759, $F(1, 28) = 8,894$, $p = 0,006$, eta-carré partiel = 0,241). Il n'y a pas d'interaction significative pour les questions FI2, FI3 et FI4 ; il n'y a pas de différence significative concernant la difficulté du jeu et la compétence des participants pour ces trois questions.

Nous avons dans un premier temps analysé les résultats de FI1 en fonction du niveau de compétence. Lorsque nous regardons en détails, il n'y a pas de différence significative entre les niveaux de difficulté pour le groupe LCG. Cependant le groupe HCG rapporte des scores significativement différents en fonction du niveau de difficulté ($p = 0,014$, $Z = -2,449$), le score étant plus élevé lorsque la difficulté est plus élevée (M(ED) = 3,86, ET = 0,864) que lorsqu'elle est moyenne (M(ND) = 3,43, ET = 0,756).

Bien que nous ne puissions conclure dans quelle mesure l'implication ressentie est directement impactée par la compétence et le niveau de difficulté, nous observons pour la deuxième passation (ED) une tendance indiquant une implication ressentie globale plus élevée pour le groupe HCG par rapport au groupe LCG (voir le tableau 6.3).

Dans l'ensemble, le groupe LCG a fait état de plus de variabilité, certains participants favorisant la première passation (pour la question FI1, M(ND) = 3,81 et M(ED) = 3,44) tandis que d'autres la seconde (pour la question FI4, M(ND) = 3,75 et M(ED) = 4,13).

Si nous ne pouvons pas affirmer, pour l'ensemble des participants, à quel point le niveau de maîtrise de l'activité cardiaque a affecté l'implication, nous observons cependant une légère tendance indiquant une plus forte implication du groupe HCG durant la seconde passation par rapport à la première (voir le tableau 6.3).

Le fait que les participants aient expérimenté deux fois la même expérience avec uniquement un changement de difficulté pourrait expliquer ces résultats. En effet, certains participants ont indiqué, durant l'entretien post-expérience, qu'ils préféraient la seconde passation, un participant du groupe LCG précisait qu'« *[il] pouvait mieux profiter de l'environnement et du jeu, c'était plus challengeant et [qu'il] se sentait plus engagé* ». A contrario, un autre participant rapporte qu'« *[il] a préféré la première passation, parce qu'elle permettait plus la découverte de l'environnement et [que] la deuxième était moins engageante* ».

TABLEAU 6.3 – Résumé statistique des réponses au questionnaire post-expérimentation concernant l'implication.

Groupe	Difficulté	FI1			FI2			FI3			FI4		
		n	M	ET	n	M	ET	n	M	ET	n	M	ET
LCG	ND	16	3,81	0,981	16	4,12	1,147	16	3,25	1,183	16	3,75	1,065
	ED	16	3,44	1,153	16	4,00	0,966	16	3,44	1,031	16	4,13	0,885
HCG	ND	14	3,43	0,756	14	4,00	0,877	14	3,36	1,008	14	4,07	0,730
	ED	14	3,86	0,864	14	4,14	1,167	14	3,50	1,019	14	4,07	0,829
Total	ND	30	3,63	0,890	30	4,07	1,015	30	3,30	1,088	30	3,90	0,923
	ED	30	3,63	1,033	30	4,07	1,048	30	3,47	1,008	30	4,10	0,845

6.4.3 Gratification Personnelle

Les résultats de notre ANOVA mixte indiquent qu'il n'y a pas d'interaction significative entre la difficulté du jeu et le niveau de compétence des participants pour les questions concernant la gratification personnelle. Il n'y a pas de différence significative des réponses aux questions PG1, PG3, PG4 et PG5 au regard de la difficulté et du niveau de compétence. Les réponses aux questions PG2 et PG6 n'ont, quant à elle, montré aucune influence significative du niveau de compétence des participants.

Nous avons observé une influence significative du niveau de difficulté sur les scores des questions PG2 (Lambda de Wilks = 0,862, $F(1, 28) = 4,491$, $p = 0,043$, eta-carré partiel = 0,138) et PG6 (Lambda de Wilks = 0,830, $F(1, 28) = 5,723$, $p = 0,024$, eta-carré partiel = 0,170). En observant les résultats dans le tableau 6.4, nous constatons que les participants vivent une expérience plus gratifiante lors de la deuxième passation.

En regardant plus en détails selon le niveau de compétence, avec un test de Wilcoxon, ces résultats sont également observables pour les participants du groupe HCG, qui ont rapporté une gratification personnelle significativement plus élevée lors de la seconde passation pour les questions PG5 ($M(ND) = 3,36$, $M(ED) = 3,71$, $p = 0,025$, $Z = -2,236$) et PG6 ($M(ND) = 3,29$, $M(ED) = 3,71$, $p = 0,034$, $Z = -2,121$). Nous pouvons rapporter que les participants du groupe HCG ont ressenti que l'expérience était plus gratifiante lorsque la difficulté est plus élevée, car elle « *était plus difficile, la difficulté était plus satisfaisante* ».

De manière surprenante, nous n'avons pas observé un plus haut niveau de gratification personnelle pour le groupe LCG pour la difficulté normale par rapport à la difficulté élevée, certains participants ayant même rapporté que la difficulté était trop faible dans cette condition et qu'elle n'était pas aussi gratifiante que la difficulté élevée.

TABLEAU 6.4 – Résumé statistique des réponses au questionnaire post-expérimentation concernant la gratification personnelle.

Groupe	Difficulté	PG2			PG6		
		n	M	ET	n	M	ET
LCG	ND	16	3,31	1,352	16	3,31	1,138
	ED	16	3,94	1,063	16	3,50	1,155
HCG	ND	14	4,00	0,877	14	3,29	0,914
	ED	14	4,29	0,726	14	3,71	1,139
Total	ND	30	3,63	1,189	30	3,30	1,022
	ED	30	4,10	0,923	30	3,60	1,133

6.4.4 Concentration

Les résultats de notre ANOVA montrent une interaction significative uniquement pour la question FA3 (Lambda de Wilks = 0,824, $F(1, 28) = 5,996$, $p = 0,021$, eta-carré partiel = 0,176). Concernant l'influence de la compétence (FA3), les résultats des tests de Wilcoxon n'ont révélé aucune différence significative pour les deux groupes, mais seulement quelques tendances. Dans le tableau 6.5, nous observons ainsi que le groupe LCG a rapporté un plus fort niveau de concentration durant la première passation, tandis que le groupe HCG a rapporté un plus fort niveau de concentration pour la seconde passation. Il n'y a pas d'interaction significative entre les deux facteurs pour les questions FA1 et FA2.

L'analyse des effets principaux montre qu'il y a une influence significative du niveau de difficulté pour la question FA1 (Lambda de Wilks = 0,761, $F(1, 28) = 8,794$, $p = 0,006$, eta-carré partiel = 0,239). Nous pouvons observer que les participants sont moins concentrés durant la première passation ($n = 30$, $M = 2,60$, $ET = 1,329$) que durant la seconde passation ($n = 30$, $M = 3,30$, $ET = 1,317$).

Cela semble indiquer que les participants ont eu besoin d'être plus concentrés lorsque la difficulté était élevée, car elle était plus exigeante dans le contrôle de la fréquence cardiaque. Cela rejoint les résultats des sections précédentes, la difficulté étant plus gratifiante mais rendant le jeu plus complexe à maîtriser.

TABLEAU 6.5 – Résultats du test de Wilcoxon sur la concentration (Question FA3).

FA3	M		Z	p
	ND	ED		
LCG	4,06	3,69	-1,732	0,083
HCG	3,79	4,00	-1,732	0,083

6.4.5 Agentivité

Les résultats de notre ANOVA mixte ne mettent en évidence aucune interaction significative entre la difficulté et le niveau de compétence pour les questions concernant l'agentivité. La question AG3 ne retourne aucun effet significatif ni du niveau de difficulté, ni du niveau de compétence des participants. Nous observons une tendance concernant l'influence du niveau de compétence des participants sur les résultats de la question AG1 ($p = 0,079$, eta-carré partiel = 0,106), le groupe HCG rapportant un plus fort sentiment d'agentivité. Cela est particulièrement observable lorsque le niveau de difficulté est élevé (AG1, $p = 0,06$, $Z = -1,883$, $M(\text{LCG}) = 2,63$, $M(\text{HCG}) = 3,43$).

Nous notons aussi une influence significative du niveau de difficulté pour la question AG2 (Lambda de Wilks = 0,754, $F(1, 28) = 9,128$, $p = 0,005$, eta-carré partiel = 0,246), les participants rapportant un plus fort sentiment d'agentivité lorsque la difficulté est normale ($n = 30$, $M(\text{ND}) = 3,83$, $ET = 0,950$) par rapport à la difficulté élevée ($n = 30$, $M(\text{ED}) = 3,13$, $ET = 1,042$). Les participants du groupe LCG ont aussi rapporté avoir significativement plus de difficulté à maîtriser la mécanique de contrôle cardiaque durant la seconde passation (AG2, $p = 0,027$, $Z = -2,216$, $M(\text{LCG-ND}) = 3,75$, $M(\text{LCG-ED}) = 2,94$).

Dans l'ensemble, nous observons que les participants du groupe HCG semblent avoir fait état d'un sentiment d'agentivité plus élevé que les participants du groupe LCG. Cela est particulièrement observable lors de la deuxième passation (voir le tableau 6.6). Bien qu'ils aient rapporté un niveau de prise en main plus exigeant au cours de la seconde passation que lors de la première, les participants du groupe HCG ont ressenti un plus fort sentiment d'agentivité lorsque la difficulté du jeu était plus élevée, car elle correspondait davantage à leurs capacités (voir le tableau 6.6). D'autre part, les participants du groupe LCG semblent faire état d'un meilleur sentiment d'agentivité lors de la première passation.

TABLEAU 6.6 – Résumé statistique des réponses au questionnaire post-expérimentation concernant l'agentivité.

		AG1			AG2			AG3		
Groupe	Difficulté	n	M	ET	n	M	ET	n	M	ET
LCG	ND	16	2,88	1,147	16	3,75	1,065	16	3,94	1,063
	ED	16	2,62	1,088	16	2,94	0,929	16	3,81	0,981
HCG	ND	14	3,29	0,994	14	3,93	0,829	14	3,79	1,188
	ED	14	3,43	0,852	14	3,36	1,151	14	4,29	0,469
Total	ND	30	3,07	1,081	30	3,83	0,950	30	3,87	1,106
	ED	30	3,00	1,050	30	3,13	1,042	30	4,03	0,809

6.4.6 Résultats objectifs

Les résultats de notre ANOVA ne mettent en évidence aucune interaction significative entre : le niveau de difficulté et le niveau de compétence ; le nombre d'échecs et le temps de complétion des niveaux.

Nous nous attendions à ce que les participants du groupe LCG obtiennent des résultats, au regard des données objectives, nettement inférieurs à ceux des participants du groupe HCG, en ne parvenant à terminer les tâches associées aux salles, ou en mettant plus de temps à compléter celles-ci. Cependant, nous n'avons trouvé aucune différence significative ni entre les deux groupes de participants (LCG et HCG) ni entre les deux niveaux de difficultés (ND et ED). Il est intéressant de noter que la plupart des participants ont réussi à surmonter les épreuves du jeu dans les deux difficultés. En effet, le nombre moyen d'échecs étant de 0,73 lors de la première passation ($M(\text{LCG-ND}) = 0,4$, $M(\text{HCG-ND}) = 0,33$) et de 0,97 lors de la seconde ($M(\text{LCG-ED}) = 0,43$, $M(\text{HCG-ED}) = 0,53$), sur 8 salles. Dans chacune des difficultés, 16 des 30 participants ont réussi les tâches proposées dans chaque salle du jeu (8 participants dans chaque groupe à chaque fois). En ce qui concerne le temps moyen nécessaire pour terminer toutes les épreuves, les participants du groupe HCG se sont montrés plus rapides lors de la première passation (356 secondes en moyenne) que ceux du groupe LCG (383 secondes en moyenne). Cependant, nous ne retrouvons pas ce résultat lors de la seconde passation où les participants enregistrent en moyenne presque les mêmes temps de complétion (447 secondes pour le groupe LCG et 448 secondes pour le groupe HCG).

6.5 Discussion

Bien que le *biofeedback* ait été étudié dans de multiples contextes, tels que les *exergames* (exercices de sport ludifiés) [Ketcheson *et al.*, 2015], les jeux vidéo [da Silva *et al.*, 2014] ou encore l'auto-efficacité [Weerdmeester *et al.*, 2017], très peu d'études ont été menées sur les effets du contrôle obligatoire du *biofeedback* sur l'expérience utilisateur en réalité virtuelle et plus précisément sur l'engagement et le sentiment d'agentivité.

Pour étudier les effets de cette nouvelle mécanique d'interaction sur l'engagement, nous mesurons différents facteurs (implication, utilisabilité, gratification et concentration) que celle-ci peut affecter. Nous avons décidé d'opposer les participants selon leur niveau de compétences dans le contrôle de la fréquence cardiaque et d'évaluer leur ressenti direct par rapport à l'expérience.

Nous avons émis l'hypothèse selon laquelle l'utilisation d'un *biofeedback* direct *via* la fréquence cardiaque pourrait être une mécanique de jeu engageante (H1). Les participants ont fait état d'un niveau élevé de satisfaction personnelle durant le jeu ($M(\text{totale}) = 3,84$, $ET = 0,65$), y compris pendant la seconde passation de l'expérience ($M(\text{ED-totale}) = 3,94$, $ET = 0,66$). À cela nous pouvons ajouter les niveaux élevés de concentration rapportés par l'ensemble des participants ($M(\text{totale}) = 3,61$, $ET = 0,61$). En effet, cela semble indiquer que les participants se sont sentis fortement engagés durant l'expérience. Bien que ce résultat puisse être aussi relié à l'utilisation de la réalité virtuelle, il est important de noter que les participants ont tous fait un état d'une expérience élevée de la réalité virtuelle. De plus, la seule mécanique d'interaction présente dans le jeu est le contrôle de la fréquence cardiaque. Ainsi, nous pouvons imputer ces forts niveaux de satisfaction personnelle et de concentration à cette mécanique uniquement. En ce qui concerne l'implication ressentie, elle est rapportée très haute par les participants ($M = 3,77$, $ET = 0,69$). Ces résultats tendent à valider notre hypothèse H1. Ces résultats sont conformes à ceux de notre première étude (présentée dans le chapitre 4), ainsi qu'à plusieurs études antérieures sur l'effet du *biofeedback* sur l'engagement [Dekker et Champion, 2007; Nacke *et al.*, 2011].

Concernant l'engagement, nos résultats démontrent qu'il existe un lien entre le niveau de compétence, le sentiment d'engagement et la difficulté du jeu. En effet, les participants qui ont été évalués comme étant hautement capables d'influencer leur fréquence cardiaque ont rapporté de meilleurs résultats globaux dans les différents facteurs de l'engagement (implication, utilisabilité, gratification et concentration). Il est intéressant de noter que les participants du groupe HCG rapportent être plus engagés lorsque la difficulté du jeu est plus élevée (ED),

comparés aux participants du groupe LCG qui eux sont plus engagés lorsque la difficulté est normale (ND). Ce qui est en accord avec la théorie du *flow* de Csikszentmihalyi. D'après nos résultats, il reste difficile de confirmer formellement que les participants ayant le plus de contrôle sont plus engagés dans l'expérience, quel que soit le niveau de difficulté (H2). Cependant, nous pouvons observer une tendance montrant un niveau d'engagement global plus élevé pour les participants du groupe HCG, grâce à des résultats plus élevés dans les différents facteurs. De plus, il est intéressant de noter que les participants compétents rapportent des niveaux d'engagement significativement plus élevés lorsque la difficulté est plus adaptée à leur niveau de compétence.

Nous avons prédit que l'utilisation d'un *biofeedback* cardiaque comme mécanique de jeu obligatoire dans une expérience de réalité virtuelle pourrait mener à un fort sentiment d'agentivité et qu'il serait lié au niveau de compétence (H3). Les résultats de notre expérience tendent à confirmer cette hypothèse. En effet, nous observons un niveau d'agentivité plus élevé chez les participants du groupe HCG, comparativement aux participants du groupe LCG. Ces résultats sont également observables lorsque l'on compare, pour chaque groupe, l'agentivité rapportée entre les deux modalités de difficulté. En effet, tandis que les participants du groupe LCG ont tendance à faire état d'un sentiment d'agentivité plus élevé durant la passation en difficulté normale, les participants du groupe HCG font état d'un niveau d'agentivité plus élevé lorsque la difficulté est élevée (voir le tableau 6.6). De plus, les participants du groupe HCG rapportent un niveau assez élevé d'agentivité, quel que soit le niveau de difficulté ($M(\text{HCG}) = 3,68$, $ET = 0,496$), ce qui signifie qu'ils ont le sentiment que leur volonté d'action (accélérer leur rythme cardiaque ou le ralentir) se traduit comme attendue dans le jeu. Les participants du groupe LCG signalent, comme il était anticipé, des résultats inférieurs pour ce facteur, mais ils rapportent des scores assez élevés lorsque la difficulté est normale ($M(\text{ND}) = 3,52$, $ET = 0,807$). Ces résultats sont en accord avec les travaux de Bandura [1982], qui souligne que l'auto-efficacité est liée au sentiment d'agentivité. Cela met l'accent sur la nécessité de proposer des expériences adaptées au niveau de chaque participant.

Les résultats en matière d'engagement et d'agentivité sont tout de même cohérents avec nos attentes. Il est toutefois important de limiter la portée de ces résultats, car les participants ont exprimé l'importance de la contextualisation du contrôle de la fréquence cardiaque dans un jeu et comment cela les a aidés à s'investir davantage et à mieux réussir. En effet, dans chacune des difficultés proposées, 16 participants ont complètement réussi le jeu. Sur les 30 participants, 25 ont confirmé que l'utilisation de la réalité virtuelle et la contextualisation

de l'interaction ont affecté leur niveau de motivation et les ont aidés à mieux relever le défi proposé. Plusieurs participants ont rapporté que « *l'immersion provoque une augmentation nette de la motivation* », que par le fait que « *ça soit un jeu [il/elle était] plus impliqué et motivé pour réussir* » et que « *l'expérience semblait plus facile en réalité virtuelle* » que durant l'étude préliminaire. Ceci est conforme aux travaux de Weerdmeester *et al.* [2017] et de Prpa *et al.* [2018]. Ces résultats peuvent aussi être rapprochés de ceux de Wollmann *et al.* [2016], qui expliquent que les jeux motivent les joueurs à s'engager plus et mieux réussir dans des situations de formations avec *biofeedback*. Cela pourrait également être relié aux conclusions des travaux de Sroufe [1971], qui indique que l'utilisation du *biofeedback* accélère grandement l'acquisition du contrôle direct de la fréquence cardiaque.

6.6 Discussion générale

De nombreuses études ont démontré l'intérêt du *biofeedback* pour l'amélioration de l'expérience utilisateur [Dey *et al.*, 2017; Gilleade *et al.*, 2005; Nacke *et al.*, 2011] et certaines d'entre elles ont souligné quelques limitations [Dekker et Champion, 2007], surtout si l'utilisation de la physiologie n'est pas entièrement prise en compte dans l'expérience par l'utilisateur. C'est ce qui a motivé cette expérimentation en deux phases. Comment l'intégration d'une boucle de *biofeedback* obligatoire dans un jeu en réalité virtuelle est-elle possible et comment affectera-t-elle l'expérience utilisateur ? Pour ce faire, nous avons construit une étude en deux parties, la première partie a été conçue pour quantifier le niveau de contrôle de la fréquence cardiaque des participants et les classer en fonction de leurs capacités. La deuxième partie a été conçue pour immerger les participants dans une expérience de réalité virtuelle où le contrôle de la fréquence cardiaque est obligatoire, afin de comprendre les effets de cette mécanique de jeu en matière d'engagement et d'agentivité.

Les résultats de cette étude en deux parties sont encourageants en ce qui concerne l'utilisation de la fréquence cardiaque comme mécanique de jeu obligatoire. En effet, les résultats obtenus au cours de la première expérience présentée dans le chapitre précédent se sont bien reportés dans l'expérience en réalité virtuelle. Les participants ont été capables de répondre aux différents défis proposés et se sont sentis récompensés par leur complétion. Nous avons également pu observer des différences dans l'engagement et l'agentivité par rapport au niveau de compétence des participants, en corrélation avec le niveau de difficulté. Bien que le contrôle de la fréquence cardiaque soit la seule mécanique d'interaction dans le jeu, les participants ont rapporté un niveau élevé d'engagement, confirmant son potentiel en tant qu'outil pour créer de l'engagement et fournir une bonne expérience utilisateur.

Il faut également souligner que les réponses aux questions sur l'agentivité et l'engagement suivent les mêmes tendances, en fonction du niveau de difficulté et des compétences des participants. À l'origine, il y a le sens de l'auto-efficacité [Bandura, 1997], qui est la croyance que l'on a en sa propre capacité à accomplir une tâche, voire à contrôler son propre état physiologique. Cela peut être relié au sentiment d'agentivité [Bandura, 1982; Blanke et Metzinger, 2009], qui est étroitement lié au sentiment d'incarnation [Kilteni *et al.*, 2012]. Comme souligné par Lessiter *et al.* [2001], les sentiments de présence et d'engagement sont interdépendants et ont une influence mutuelle l'un sur l'autre. D'un point de vue plus théorique, cela pourrait signifier que l'ajout de notre mécanique de jeu basé sur le contrôle de la fréquence cardiaque pourrait induire suffisamment d'agentivité pour provoquer un haut niveau d'engagement *via*

une amélioration du sentiment de présence, conclusion que l'on retrouve dans les travaux de Sra *et al.* [2018]. Il est intéressant de noter que certains participants ont exprimé que le fait que leurs actions aient des conséquences réelles pendant le jeu les a aidés à s'engager davantage pendant l'expérience. L'un en particulier disant qu'« [il avait] le sentiment d'être pleinement transposé dans l'environnement, [il avait] le sentiment d'avoir un double virtuel physicalisé qui avait un réel impact. » Intégrer une boucle de *biofeedback* obligatoire pourrait donc créer une forme de synchronie physiologique, améliorant la sensation de présence, comme le concluent Salminen *et al.* [2018], elle influencerait également le processus d'incarnation.

Le fait que nous n'ayons pas imposé aux participants une méthode précise de contrôle du rythme cardiaque a pu ajouter une variabilité dans leur réussite et leur expérience. Cependant, si tous les participants ont été exposés à des techniques de contrôle de l'activité cardiaque par la respiration dans la première phase de cette série d'expériences, la liberté que nous leur avons offerte a permis le développement de différentes techniques et stratégies de contrôle cardiaque (e.g., activité physique, méditation, respiration). Dans la seconde phase de cette expérimentation, celles-ci se ont bien été observées, la majorité de nos participants réussissant pleinement le jeu. Cela met en lumière la richesse du *biofeedback* comme mécanique d'interaction, que les participants sont capables d'assimiler et de s'approprier, personnalisant ainsi leur expérience.

Ces résultats semblent conforter l'intérêt de l'utilisation d'un *biofeedback* volontaire et contrôlé pour améliorer l'expérience utilisateur en réalité virtuelle. En effet, les conclusions que nous avons formulées apparaissent en accord avec les travaux de Jeunet *et al.* [2018], sur la définition du sens de l'agentivité. Le *biofeedback* permet un changement du locus de contrôle de la physiologie des participants, vers une source plus personnelle. Ainsi, par la prise en main de ses propres réactions physiologiques (sensation d'agentivité), couplé avec des conséquences congruentes (jugement d'agentivité), le sens de l'agentivité s'en trouve augmenté, et par conséquent, les sentiments d'incarnation [Kilteni *et al.*, 2012], de présence [Sanchez-Vives et Slater, 2005] et d'engagement [Lessiter *et al.*, 2001].

6.7 Limitations

Au cours des entretiens post-expérimentation, la plupart des participants ont indiqué que le fait que l'expérience se soit déroulée dans le cadre d'un jeu en réalité virtuelle avait eu un fort impact sur leur motivation et leur réussite, ce qui peut être considéré comme une limitation de notre travail. Cela a pu entraîner, dans une moindre mesure, un changement du niveau d'implication et brouiller les intervalles des classifications que nous avons faits d'après les résultats de la première partie de cette expérimentation (chapitre 5). Il pourrait être intéressant de faire faire la pré-expérimentation dans un environnement de réalité virtuelle ludifié et de comparer les résultats de contrôle de la fréquence cardiaque. Cependant, cela pourrait s'avérer difficile pour les participants. En effet, la pré-expérimentation est plus longue (la durée de chaque épreuve étant de 1 minute 30) et plus exigeante concernant les amplitudes de rythme cardiaque attendues. Ainsi, le fait d'équiper entièrement les participants et de les immerger pendant cette exercice pourrait avoir des effets négatifs sur leur expérience et leur confort. Cependant, cela pourrait nous permettre de redéfinir les intervalles de compétence considérés précédemment et ainsi d'obtenir une meilleure distinction du niveau de compétence de nos participants.

La seconde phase de notre expérimentation prenant part plusieurs semaines après la première, une partie du panel original des participants n'était plus disponible pour réaliser l'expérience en réalité virtuelle. Nous avons construit des groupes de passation avec un maximum de participants tout en essayant de garder une homogénéité dans la répartition. Il serait intéressant, dans une expérimentation future, d'utiliser un groupe de participants suivant directement la distribution normale de la compétence, que nous avons observée dans la première phase.

Même si l'expérience en réalité virtuelle a provoqué de très hauts niveaux d'engagement, il est intéressant de noter que certains participants se sont sentis quelque peu frustrés par l'absence d'interactions directes, autres que le *biofeedback*. Cependant, comme nous voulions étudier les effets du contrôle de la fréquence cardiaque en tant que mécanique directe et obligatoire, nous avons décidé de ne pas introduire de mécanique d'interaction supplémentaire. Il pourrait être intéressant d'inclure, dans d'autres études, des interactions physiques plus directes, celles-ci pourraient mener à des expériences plus riches, plus complètes. La combinaison du mouvement et du contrôle de la fréquence cardiaque pourrait cependant être difficile à équilibrer, car le mouvement pourrait influencer la fréquence cardiaque et la charge cognitive pourrait s'avérer trop lourde à supporter pour les utilisateurs.

Chapitre 7

Conclusion

Sommaire

7.1	Introduction	130
7.2	Réponses aux questions de recherche et discussion des hypothèses	132
7.2.1	Avantages et limitations de l'outil connecté	132
7.2.2	Le <i>biofeedback</i> comme mécanique d'interaction	133
7.2.3	Augmenter l'expérience utilisateur	135
7.3	Contributions à la connaissance	138
7.4	Limites	139
7.5	Travaux futurs	141

7.1 Introduction

Le cadre théorique de cette thèse est centré sur l’approfondissement de la connaissance concernant l’impact de l’utilisation du *biofeedback* cardiaque sur l’expérience utilisateur dans les expériences virtuelles immersives. Cet objectif provient du constat de l’évolution de la réalité virtuelle avec notamment l’avènement des technologies mobiles et connectées. En effet, chaque personne possédant un smartphone peut bénéficier d’expériences de réalité virtuelle de haute qualité, celles-ci sont cependant souvent limitées par le manque d’interactions qu’elles proposent. Cela est dû au fait que ces plateformes ne sont pas équipées d’outils permettant de proposer des schèmes d’interactions directs ou innovants, car reposant principalement sur de la commande visuelle. Nous avons alors considérés les objets connectés portés comme un moyen d’ajouter de l’interaction et donc d’améliorer l’expérience utilisateur en environnement virtuel immersif. Déjà ancrés dans l’écosystème connecté des smartphones, en matière de demande consommateur [Evans, 2011; Piwek *et al.*, 2016] mais aussi de qualité de captation [Wang *et al.*, 2017], la forte évolution de ces outils les qualifient comme une solution pouvant repousser les limites de l’interaction dans des plateformes mobiles de réalité virtuelle et améliorer l’expérience utilisateur.

Ainsi, si de nombreuses études se sont penchées sur l’utilisation de la physiologie dans des applications interactives pour détecter les émotions [Lobel *et al.*, 2016; Parnandi et Gutierrez-Osuna, 2018] ou augmenter l’expérience utilisateur [Nacke *et al.*, 2011; Nogueira *et al.*, 2016], peu se sont concentrées sur l’analyse de l’intégration d’un *biofeedback* issu de capteurs connectés dans une expérience virtuelle immersive. De ce constat a émergé l’ambition principale de ce travail de thèse : étudier la faisabilité et les apports, en matière d’expérience utilisateur, de l’ajout d’un *biofeedback* issu des objets connectés dans les expériences virtuelles immersives. Ainsi, notre étude se divise en trois sous-objectifs que nous avons formulés sous forme de questions de recherches, la première portant sur l’utilisabilité des objets connectés pour la réalité virtuelle, la deuxième concernant les apports et modalités du *biofeedback* cardiaque sur l’expérience utilisateur et enfin la dernière concernant l’utilisation de l’activité cardiaque comme une mécanique d’interaction en environnement virtuel immersif.

Dans notre démarche, nous avons à cœur d’apporter une meilleure compréhension de l’expérience utilisateur en environnement virtuel et notamment concernant l’impact de l’utilisation des données physiologiques sur celle-ci. Nous souhaitons proposer une méta-analyse des interactions physiologiques et de leurs implications en réalité virtuelle. Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter les réponses que nous avons apportées concernant l’apport des

objets connectés, l'utilisation du *biofeedback* comme mécanique d'interaction et enfin nous présenterons les effets sur l'expérience utilisateur, mis en évidence lors de nos expérimentations.

7.2 Réponses aux questions de recherche et discussion des hypothèses

7.2.1 Avantages et limitations de l'outil connecté

Q1 : Quels sont les avantages et les inconvénients de l'utilisation des objets connectés dans une expérience de réalité virtuelle immersive ?

Le premier objectif de notre étude était de démontrer la fiabilité et l'intégrabilité d'un *wearable* comme un moyen d'inclure du *biofeedback* dans des expériences de réalité virtuelle. Pour ce faire, il nous était nécessaire de démontrer la robustesse des données captées par ces outils, d'étudier le confort d'utilisation et d'intégrer le *body sensor network* dans le cadre d'une expérience de réalité virtuelle. Notre revue de littérature nous a en grande partie permis de confirmer la qualité des données captées par les outils connectés, les résultats de Wang *et al.* [2017] confirmant leur précision dans le cadre d'expériences sportives ou de divertissement. De plus, leur utilisabilité dans le cadre de la recherche scientifique est aussi prometteuse, comme le montrent Züger et Fritz [2015], Reinerman-Jones *et al.* [2017] et Hänsel *et al.* [2018]. D'autres études ont aussi permis de mettre en avant l'utilisabilité des outils connectés dans le cadre d'applications concrètes [He *et al.*, 2016; Miranda *et al.*, 2018; Züger et Fritz, 2015]. Les résultats des différentes expérimentations que nous avons menées pointent vers des conclusions similaires. En effet, si nous n'avons pas comparé les données obtenues avec des mesures issues de capteurs médicaux, garantissant une très haute précision, nous avons observé des relevés cardiaques cohérents, avec très peu de valeurs aberrantes. Par ailleurs, lors de notre première expérimentation (chapitre 4), les valeurs de rythme cardiaque relevées étaient en accord avec le niveau de peur rapporté par les participants.

Si des études se sont penchées sur la possibilité d'intégrer des capteurs connectés dans des systèmes de réalité virtuelle [Marín-Morales *et al.*, 2018; Muñoz *et al.*, 2017; Muñoz *et al.*, 2016b], celles-ci se sont principalement concentrées sur les aspects techniques de l'intégration et la fiabilité des données récupérées. Supposant les qualités ergonomiques de ces outils, ces études ne s'intéressent pas au confort d'utilisation et à l'invasivité ressentie par les utilisateurs. Dans notre première phase de travaux, présentée dans le chapitre 4, nous avons demandé aux participants leur ressenti en matière de confort d'utilisation du bracelet et comment celui-ci s'intégrait dans le système. Les résultats étaient fortement positifs, les participants ne prêtant aucune attention au bracelet lors des sessions d'immersion. De plus, sur l'ensemble des expérimentations, les participants n'ont émis aucuns retours négatifs concernant le confort

relatif au bracelet. Bien que le panel reste limité en nombre d'utilisateurs ($n = 32$), ces résultats semblent indiquer que les outils connectés peuvent prétendre à être utilisés dans des systèmes de réalité virtuelle complets sans encombrement. Nous avons en outre noté un fort intérêt des participants vis-à-vis de l'utilisation de ces outils, ajoutant une nouvelle dimension à l'immersion en réalité virtuelle, et leurs futurs usages dans le divertissement, la santé, la détection d'émotions ou encore la formation. Nous considérons donc ce travail comme une avancée encourageante vers l'évolution de l'intégration du *body sensor network* dans des expériences virtuelles immersives.

Toutefois, si la précision de ces capteurs et leur intégration simple dans un système de réalité virtuelle complet semblent les qualifier pour introduire du *biofeedback* ou encore réaliser de la détection d'émotions dans les EVI, ils comportent encore des limites pour des usages en lien avec la santé. En effet, ces outils n'ont pas encore une précision similaire à celle des capteurs médicaux, qui permettrait de développer une métrique fiable en appui sur la biologie des émotions. En effet, la simplification des signaux limite les usages liés à la détection d'émotions ; le bracelet que nous avons utilisé, comme la majorité des bracelets connectés, ne nous fournissait que le rythme cardiaque sous forme d'une estimation du nombre de battements par minute. Ainsi, notre analyse de l'émotion reste binaire, nous avons la capacité de détecter ou non une émotion unique. Comme nous avons un contrôle sur l'émotion qu'induit notre environnement, nous pouvons déterminer lorsque cette émotion est ressentie par l'utilisateur. Il est aujourd'hui complexe d'offrir plus de profondeur à la détection. De nouvelles perspectives sont cependant envisagées à travers l'apparition sur le marché de nouveaux types de bracelets, recueillant une palette plus large de données et avec une transmission de signaux plus fiable, permettant l'analyse et la compréhension des réactions psychophysiologiques.

7.2.2 Le *biofeedback* comme mécanique d'interaction

Q3 : L'activité cardiaque peut-elle être une mécanique d'interaction en environnement virtuel immersif ?

L'un des objectifs de nos travaux était d'étudier l'utilisation d'un *biofeedback* cardiaque comme une mécanique d'interaction en réalité virtuelle. Ainsi, nos deux expérimentations se sont centrées sur deux types de mécaniques de *biofeedback* distinctes : une active et une passive.

Lors de notre première expérimentation, le *biofeedback* était une mécanique de jeu passive, c'est-à-dire que l'environnement et divers aspects du jeu se modifiaient en prenant en compte la réaction psychophysiologique de l'utilisateur, sans que ce dernier n'ait d'influence directe sur sa physiologie. Notre expérience a démontré que malgré la nouveauté du système, les par-

participants ont été capables dans une certaine mesure, de contrôler leur réponse physiologique et de vivre pleinement l'expérience de jeu. Cependant, il est important de noter que l'ajout du *biofeedback* a entraîné une complexification de la courbe d'apprentissage, rendant nécessaire l'ajout d'un tutoriel complet. Les réponses au questionnaire démontrent par ailleurs que même les joueurs n'ayant pas activement essayé de contrôler leur rythme cardiaque ont préféré l'expérience utilisant cette donnée, l'un d'entre eux justifiant ce choix car « *[il] se sentait comme dans une histoire qu'[il] écrivait [lui] même plutôt qu'une expérience pré-écrite.* » Ainsi, ces résultats appuient qu'un *biofeedback* cardiaque passif est une mécanique d'interaction appréhendable et améliore l'expérience utilisateur. Et même si la nouveauté de ce type d'interaction et le niveau de contrôle variable du rythme cardiaque ajoute à la difficulté de prise en main, l'utilisabilité de ce type de *biofeedback* est évaluée comme forte par nos participants.

Dans notre deuxième expérimentation, nous avons mis en place une série d'expériences conçues pour étudier l'effet d'une mécanique obligatoire de contrôle de la fréquence cardiaque. L'importance de proposer une tâche proportionnée par rapport au niveau de compétence de l'utilisateur étant connue, nous avons dans un premier temps quantifié le niveau de contrôle de l'activité cardiaque d'un panel de participants et les niveaux acceptables de contrôle à proposer lors d'une expérience interactive. Nous avons ensuite sélectionné une partie de ces participants pour les confronter à une boucle de *biofeedback* obligatoire à la complétion d'un jeu. Nous avons été en mesure de transférer directement les résultats de la première partie de cette étude vers une expérience de réalité virtuelle. Lors de cette étude, nous avons observé que les participants ont été en mesure de contrôler leur activité cardiaque pour compléter les différentes épreuves qui leur étaient proposées. De plus, l'intégration de cette mécanique de jeu a permis d'induire un fort sentiment d'agentivité, celui-ci étant lié au niveau de compétence de nos participants. L'utilisation du *biofeedback* volontaire direct sur la fréquence cardiaque a permis de générer un niveau élevé d'engagement chez les participants. Il est important de noter que, lors de cette expérience, le *biofeedback* était la seule mécanique d'interaction, ce qui signifie que les effets de l'interaction sur les différents facteurs de l'engagement et de l'agentivité étaient dus uniquement à ce contrôle volontaire de la physiologie. Nous remarquons cependant que les participants ont démontré une bien meilleure capacité au contrôle cardiaque lors de l'expérience virtuelle immersive que lors de la première partie de l'expérience. Lorsqu'ils étaient interrogés à propos de ces résultats, les participants nous ont rapporté les effets de l'habituation et l'importance de la contextualisation de l'interaction, qui leur ont permis de transférer leur aptitude au contrôle cardiaque vers une expérience ludique en réalité virtuelle.

Les résultats de ces expérimentations nous ont permis de qualifier le *biofeedback* cardiaque comme une mécanique intéressante et utilisable pour des expériences virtuelles immersives. Que celui-ci apporte une dimension passive à l'expérience, en affectant l'environnement, ou alors une dimension active, en rendant l'utilisateur acteur de sa propre physiologie pour effectuer des actions volontaires contextuelles. Il est toutefois important de noter que l'ajout d'une boucle de *biofeedback* peut entraîner une baisse de l'utilisabilité d'un système et qu'il est nécessaire de fournir des tutoriels ou un entraînement préalable au contrôle physiologique.

7.2.3 Augmenter l'expérience utilisateur

Q2 : Quels sont les apports et modalités d'une boucle de rétroaction biologique cardiaque sur l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif ?

Notre revue de littérature nous a permis de déterminer que l'ajout du *biofeedback* dans des expériences interactives affectait positivement l'engagement [Dekker et Champion, 2007; Dey *et al.*, 2017; Nacke *et al.*, 2011]. Lors de notre première expérimentation nous avons donc proposé un jeu en réalité virtuelle avec un *biofeedback* en appui sur le rythme cardiaque. En opposant deux versions du même jeu, une sans *biofeedback* et une avec, nous avons été en mesure d'étudier les effets du *biofeedback* sur l'expérience utilisateur.

Nos résultats n'ont pas présenté de différences significatives concernant l'implication des participants entre la version augmentée par physiologie et la version contrôle. Cependant, nous avons observé une tendance indiquant un plus haut niveau d'implication et des différences significatives concernant les participants ayant activement essayé de contrôler leur rythme cardiaque par rapport à ceux qui n'ont pas directement pris en compte cette mécanique. Il est ainsi intéressant de noter que cela est en accord avec notre modèle de l'immersion physiologique, décrit dans le chapitre 2, et à l'importance de l'impact des émotions lors d'une expérience virtuelle immersive. En effet, en transposant les émotions de l'utilisateur directement dans l'expérience qu'il est en train de vivre, et grâce à ses données physiologiques, son sentiment de présence est d'autant plus fort s'il est conscient de ce transfert. Utiliser un tel *biofeedback* peut avoir des effets immédiats sur « l'émotion d'immersion » définie par Murphy [2016]. Ces résultats sont en accord avec les conclusions de notre état de l'art, qui a permis de comprendre les liens entre la présence et les émotions en environnement virtuel, par l'influence du *biofeedback* sur l'engagement utilisateur.

Nous notons que les effets sur le niveau d'engagement rapporté par les utilisateurs sont principalement observables lorsque les participants prennent pleinement en compte la mécanique de *biofeedback* dans leur expérience. En effet, dans notre première expérience, le

biofeedback n'était pas obligatoire, ses effets n'étaient probablement pas assez identifiables par les participants. Inciter un utilisateur à intégrer volontairement une mécanique de *biofeedback* à son expérience est crucial pour rendre celle-ci plus engageante et doit être considéré pleinement dès la conception. D'après ces résultats, et en lien avec notre revue de littérature indiquant qu'il est possible pour un individu d'avoir un contrôle volontaire sur son rythme cardiaque [Manuck *et al.*, 1975; Sroufe, 1971; Stephens *et al.*, 1975], dans notre deuxième étude nous avons proposé une expérience durant laquelle le contrôle du rythme cardiaque serait une mécanique obligatoire. Cependant, il est nécessaire d'effectuer de nombreux tests dans diverses conditions et applications afin de déterminer un équilibre entre les effets sur l'expérience, la difficulté de contrôle et les récompenses. Pour contrôler nos variables efficacement, nous avons divisé notre seconde expérience en deux temps. La première permettait de mesurer le niveau de compétence de nos participants ainsi que le niveau de difficulté acceptable concernant le contrôle cardiaque. Cette première partie nous a permis de séparer nos participants en deux groupes relativement à leur niveau de compétence. Durant la seconde phase, nous avons plongé ces mêmes participants dans une expérience virtuelle immersive où le contrôle cardiaque était obligatoire.

Bien qu'il n'y ait que peu de différences significatives directes entre nos deux groupes de participants lors de la seconde expérience, notre échantillon présentait une tendance indiquant un niveau d'engagement plus élevé et un sentiment d'agentivité plus fort chez les participants considérés comme très compétents en matière de contrôle de la fréquence cardiaque. Les différences entre les deux niveaux de difficulté proposés montrent que la difficulté accrue a permis d'obtenir de meilleurs résultats pour les participants très compétents. Comme l'indique Tcha-Tokey *et al.* [2016] dans son modèle de l'expérience utilisateur en réalité virtuelle, la compétence est un facteur important dans l'induction du *flow*. Nous notons que le niveau de compétence de nos participants se reflète dans leur niveau d'engagement rapporté, indiquant que le *biofeedback* volontaire est porteur d'un fort niveau d'engagement et d'une amélioration de l'expérience utilisateur lorsqu'il est abordable. Cependant, il est important de prendre ces conclusions avec un certain recul. En effet, les résultats objectifs n'ont pas révélé de différences significatives entre les deux groupes, ce qui pourrait être attribué à l'intensification de la motivation rapportée par rapport à la première phase. Ce changement de motivation a été provoqué par l'utilisation de la réalité virtuelle et de la contextualisation de l'interaction par *biofeedback*. En effet, en étant davantage investis dans l'expérience, les participants ont déclaré être plus à même de se concentrer et avoir un meilleur contrôle sur leur fréquence cardiaque.

Les résultats de nos expériences semblent ainsi en accord avec notre modèle théorique

liant l'auto-efficacité physiologique et l'engagement, dans le cadre du contrôle volontaire de la fréquence cardiaque. En ayant un effet sur le sentiment d'agentivité, le contrôle volontaire de la fréquence cardiaque pourrait influencer les sentiments d'incarnation et de présence et ainsi améliorer l'engagement utilisateur (voir figure 7.1). En explorant comment l'immersion physiologique peut avoir un effet sur le sentiment d'incarnation en réalité virtuelle immersive, il serait possible de créer un sentiment de synchronisation physiologique entre un utilisateur et son avatar, ce qui pourrait entraîner une amélioration des sentiments de présence et d'incarnation [Salminen *et al.*, 2018].

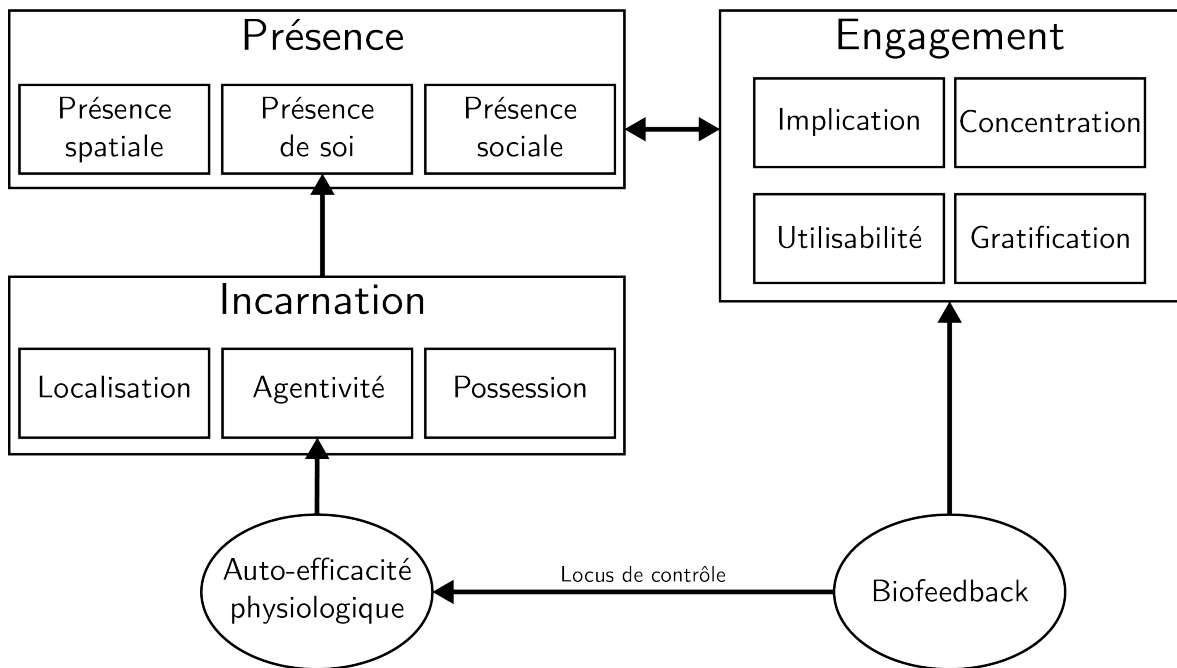


FIGURE 7.1 – Modèle théorique « immersion physiologique »

Dans une mesure plus subjective, il faut souligner que les participants ont exprimé un fort enthousiasme lors des différentes expériences vécues. Les participants de la seconde expérimentation ont émis des retours positifs au sujet de la série d'expériences qu'ils ont réalisée. Certains d'entre eux ont même rapporté que ces expériences les avaient aidés à mieux comprendre comment ils pouvaient influencer leur fréquence cardiaque et comment ce type d'expériences pourrait les aider au quotidien.

7.3 Contributions à la connaissance

L'apport principal de ce travail de thèse réside dans les résultats de nos études empiriques, ceux-ci démontrant l'intérêt de l'utilisation d'un *biofeedback*, tant passif qu'actif, dans des expériences de réalité virtuelle. Nous appuyons les résultats d'études précédentes et démontrons que l'intégration d'un *biofeedback* cardiaque *via* des objets connectés non invasifs permet d'augmenter le sentiment d'engagement dans des expériences de réalité virtuelle. De plus, nous avons démontré qu'il est possible d'intégrer ce *biofeedback* comme une mécanique d'interaction obligatoire et que celle-ci peut être porteuse d'un fort sentiment d'agentivité. Cela conforte l'intérêt de l'utilisation de la réalité virtuelle dans le cadre d'applications de formation à l'auto-efficacité physiologique. En outre, notre revue de littérature couplée aux résultats obtenus lors de nos différentes expérimentations, nous a permis de construire l'ébauche d'un modèle théorique de « l'immersion physiologique » liant l'intégration de la physiologie dans des expériences virtuelles immersives aux sentiments de présence et d'immersion.

Notre travail nous a aussi permis d'apporter des contributions pratiques concernant l'utilisation du *biofeedback* pour des applications interactives. La première de ces contributions est notre technique de calibration du rythme cardiaque, rapide et simplement implémentable, procédure qui peut être facilement répliquée lors d'expériences impliquant le recueil de paramètres physiologiques. La deuxième contribution pratique est le système mis en place lors de la première phase de notre seconde expérimentation (chapitre 5), qui nous permet de mesurer la capacité des participants à contrôler leur rythme cardiaque. Les résultats obtenus lors de cette expérimentation laissent à penser qu'il serait possible de généraliser ce système pour obtenir une distribution représentative sur une population plus grande.

7.4 Limites

Dans les discussions de nos expérimentations, nous avons exposé les limites des différentes études que nous avons menées. Nous allons maintenant revenir sur celles-ci plus en détails afin de mieux comprendre leurs implications dans le cadre de futurs travaux.

Dans un premier temps, nous nous sommes heurtés aux limites inhérentes aux capteurs connectés : la précision et la disponibilité des données. En effet, dans le cadre de notre étude, le choix d'utiliser un capteur grand public nous a limité pour accéder aux données brutes et nous a limité à l'observation d'une estimation du nombre de battements par minute. Ainsi ce type d'outil, bien que relativement précis dans sa captation, ne nous permet pas d'avoir une analyse profonde de l'état psychophysiologique de nos participants, rendant la détection d'émotions binaire. Dans le cas d'expériences virtuelles induisant des émotions, les conséquences de différents stimuli sur la physiologie de l'utilisateur peuvent être anticipées. Mais si l'environnement virtuel est vecteur d'une palette d'émotions plus complexe, alors ce type d'outil ne nous permet pas encore d'avoir une analyse suffisamment fine pour distinguer les réponses émotionnelles. Dans le cadre d'expériences virtuelles proposant un *biofeedback* affectif et utilisant des outils ne donnant pas accès au signaux captés bruts, il reste nécessaire de limiter l'induction et la détection d'émotions à un seul état émotionnel.

Lors de notre première expérimentation (chapitre 4), nous avons constaté que les participants avaient eu du mal à remarquer les différences entre les deux versions du jeu qui leur étaient proposées (avec et sans *biofeedback*). Dans le cadre d'un *biofeedback* passif, il est important de mettre en avant les marqueurs de celle-ci sans pour autant qu'ils prennent le pas sur l'expérience. Bien qu'ils aient été informés de l'utilisation de leur rythme cardiaque pour l'augmentation du jeu, une partie des participants n'a pas pris pleinement en compte cette nouvelle mécanique de jeu lors de l'expérience, ce qui a limité l'analyse de ses effets sur l'expérience utilisateur. Les participants ayant pris consciemment cette mécanique en compte ont quant à eux rapporté un plus fort niveau d'engagement. Pour approfondir nos conclusions, il aurait été intéressant de rendre les effets du *biofeedback* plus importants, pour que celui-ci soit pris en compte par tous les participants et observer potentiellement plus de différences sur l'intégralité de notre panel. Cependant, cette augmentation de l'effet de rétroaction aurait pu agir désavantageusement sur l'expérience, la rendant trop complexe et ne bénéficiant pas à l'expérience utilisateur. Des études préalables plus poussées sur l'équilibrage de cette mécanique sont nécessaires pour la mise en place d'un *biofeedback* détectable mais pas omniprésent. De plus, lors de cette expérimentation basée sur le sentiment de peur, nous

avons supposé que le biais d'habituation limiterait fortement l'induction de l'état émotionnel lors de la seconde passation, c'est pourquoi nous n'avons enregistré de résultats que pour la première des conditions. Nous avons pourtant remarqué, *a posteriori*, que les participants ressentiaient un fort sentiment de peur lors de leur seconde passation, bien que l'expérience soit sensiblement identique. En réalisant de nombreux tests préliminaires, il aurait été possible de mesurer cet effet d'habituation et ainsi de pouvoir prendre en compte des mesures lors de la deuxième passation.

Enfin, nous avons aussi noté l'importance de la contextualisation des interactions et la forte tendance de la réalité virtuelle à générer de l'engagement dans le cadre de notre seconde étude (chapitre 5 et 6). En effet, si notre classification de la capacité des participants à contrôler leur propre rythme cardiaque présente des résultats cohérents lors de l'expérience en réalité virtuelle, la majorité des participants ont réussi l'intégralité des épreuves qui leur étaient proposées. Plusieurs d'entre eux justifiaient cette réussite et cette montée en compétence par le fait que les interactions étaient contextualisées lors de l'expérience virtuelle et que celle-ci offrait un plus grand niveau d'immersion et d'engagement par rapport à la première partie de l'expérimentation.

7.5 Travaux futurs

Les trois années de travaux réalisés dans le cadre de cette thèse de doctorat arrivent à leur terme, elles représentent aussi une ouverture vers des perspectives de recherche plus approfondies sur deux axes majeurs : l’affinement de la compréhension des apports du *biofeedback* sur l’expérience utilisateur en environnement virtuel immersif et le prolongement de l’étude de l’intégration des *wearables* comme moyens d’interaction en réalité virtuelle.

Le premier point sur lequel nous souhaitons poursuivre ces travaux de recherche concerne l’approfondissement de l’analyse du modèle « d’immersion physiologique » que nous avons proposé à la conclusion de notre état de l’art (chapitre 2). Si l’analyse des différents modèles de l’expérience utilisateur conjuguée à nos résultats semble indiquer qu’il y a effectivement un effet positif de l’inclusion du *biofeedback* sur les sentiments de présence et d’incarnation, nous n’avons à ce jour pas réalisé d’expérience dédiée uniquement à la vérification de ce phénomène. Dans le cadre de cette il serait important de déterminer les différents effets sur l’utilisateur que pourrait avoir la mise en place d’une telle synchronie, autant sur l’expérience dans l’environnement virtuel que sur les conséquences suite à une telle exposition. Si la représentation qu’a un utilisateur de lui-même dans une expérience virtuelle peut avoir un impact comportemental (l’effet *Proteus* [Yee et Bailenson, 2007]) ou encore cognitif [Banakou *et al.*, 2018; Osimo *et al.*, 2015], nous n’avons pas trouvé de conclusions concernant l’impact de la représentation des données physiologiques sur ces mêmes facteurs.

L’autre suite logique de nos travaux porterait sur l’inclusion d’autres signaux physiologiques, tels que la conductance cutanée ou encore la respiration. De plus en plus de bracelets connectés sont équipés de multiples capteurs, certains annonçant même être capables de reconnaître automatiquement les états émotionnels (*Feel*^{®1}, *Empatica E4*^{®2} ou encore *Ankkoro*^{®3}). L’utilisation de tels outils nous permettrait d’approfondir l’étude de l’utilisation de la physiologie sans rien ajouter à l’encombrement important des systèmes de réalité virtuelle.

Enfin, nous souhaiterions exploiter plus encore les capacités du *body sensor network* dans l’ajout d’interactions en réalité virtuelle. Une majorité d’objets connectés dits *wearables* sont aujourd’hui équipés de centrales inertielles. En utilisant ces données inertielles, il serait possible de proposer des métaphores d’interaction et de navigation sans avoir à investir dans des systèmes de suivi de mouvements coûteux et/ou encombrants. Un exemple concret est celui

1. <https://www.myfeel.co/>

2. <https://www.empatica.com/en-eu/research/e4/>

3. <http://ankkoro.com/>

de la podométrie par mesure inertielle, qui est déjà très développée et intégrée sur de nombreux objets connectés (des smartphones jusqu'aux trackers d'activité). La navigation est un aspect principal de l'immersion en environnement virtuel immersif : sans navigation et sans exploration, l'environnement virtuel offre simplement une expérience de contemplation. Si la navigation inertielle reste un encore un défi technique, proposer des métaphores engageantes et ne provoquant pas de *motion sickness* est possible. De plus, l'utilisation de ces capteurs pourrait aussi être utile pour réaliser la reconnaissance de gestes simples, permettant la mise en place d'interactions plus naturelles dans le cadre d'expériences de réalité virtuelle mobile.

Bibliographie

- AL OSMAN, H., EID, M. et EL SADDIK, A. (2013). U-biofeedback : a multimedia-based reference model for ubiquitous biofeedback systems. *Multimedia Tools and Applications*, 72(3):3143–3168. 31
- ALI, S., YAZDI, E. T. et WILLIG, A. (2013). Investigations on passive discovery schemes for ieee 802.15.4 based body sensor networks. *In 2013 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference, ATNAC '13*, pages 89–94. 45
- ALVES, T., GAMA, S. et MELO, F. S. (2018). Flow adaptation in serious games for health. *In 2018 IEEE 6th International Conference on Serious Games and Applications for Health, IEEE SeGAH '18*, pages 1–8. 38
- AMBINDER, M. (2011). Biofeedback in gameplay : How valve measures physiology to enhance gaming experience. *In Game Developers Conference, GDC '11*. 52, 69
- ANDERSON, A., HSIAO, T. et METSIS, V. (2017). Classification of emotional arousal during multimedia exposure. *In Proceedings of the 10th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA '17*, pages 181–184, New York, NY, USA. ACM. 27
- ARGASIŃSKI, J. K., WĘGRZYN, P. et STROJNY, P. (2018). Affective VR serious game for firefighter training. *Workshop on Affective Computing and Context Awareness in Ambient Intelligence*. 41, 43
- ARGELAGUET, F., HOYET, L., TRICO, M. et LECUYER, A. (2016). The role of interaction in virtual embodiment : Effects of the virtual hand representation. *In 2016 IEEE Virtual Reality, IEEE VR '16*, pages 3–10. 64, 113
- ASSOCIATION FOR APPLIED PSYCHOPHYSIOLOGY AND BIOFEEDBACK (2018). <https://www.aapb.org/i4a/pages/index.cfm?pageid=3463>. 30
- BALES, R. F. (2001). *Social Interaction Systems : Theory and Measurement*. Transaction Publishers. 26

- BANAKOU, D., KISHORE, S. et SLATER, M. (2018). Virtually being einstein results in an improvement in cognitive task performance and a decrease in age bias. *Frontiers in Psychology*, 9:917. 141
- BANAKOU, D. et SLATER, M. (2014). Body ownership causes illusory self-attribution of speaking and influences subsequent real speaking. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(49):17678–17683. 22, 23
- BANDURA, A. (1982). Self-efficacy mechanism in human agency. *American psychologist*, 37(2):122–147. 7, 22, 32, 52, 105, 123, 125
- BANDURA, A. (1993). Perceived self-efficacy in cognitive development and functioning. *Educational Psychologist*, 28(2):117–148. 32
- BANDURA, A. (1997). *Self-Efficacy : The Exercise of Control*. Worth Publishers, 1st édition. 32, 125
- BAÑOS, R., BOTELLA, C., LIAÑO, V., GUERRERO, B., REY, B. et ALCAÑIZ, M. (2004). Sense of presence in emotional virtual environments. *Proceedings of Presence*, pages 156–159. 14
- BERSAK, D. (2001). Intelligent biofeedback using an immersive competitive environment. *Online Proceedings Ubicomp 2001 Workshop on Designing Ubiquitous Computer Games*. 35, 39, 43
- BIAN, Y., YANG, C., GAO, F., LI, H., ZHOU, S., LI, H., SUN, X. et MENG, X. (2016). A framework for physiological indicators of flow in vr games : Construction and preliminary evaluation. *Personal Ubiquitous Comput.*, 20(5):821–832. 28
- BICKMORE, T., SCHULMAN, D. et YIN, L. (2010). Maintaining engagement in long-term interventions with relational agents. *Applied Artificial Intelligence*, 24(6):648–666. 18
- BIOCCA, F. (1997). The cyborg’s dilemma : Progressive embodiment in virtual environments. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2). 22, 53
- BIOCCA, F. (2003). Can we resolve the book, the physical reality, and the dream state problems? from the two-pole to a three-pole model of shifts in presence. *In EU Future and Emerging Technologies, Presence Initiative Meeting*. 12, 13, 69
- BLANKE, O. et METZINGER, T. (2009). Full-body illusions and minimal phenomenal selfhood. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(1):7 – 13. 21, 125

- BOHUS, D. et HORVITZ, E. (2009). Models for multiparty engagement in open-world dialog. *In Proceedings of the SIGDIAL 2009 Conference : The 10th Annual Meeting of the Special Interest Group on Discourse and Dialogue*, SIGDIAL '09, pages 225–234, Stroudsburg, PA, USA. Association for Computational Linguistics. 18
- BONANNO, G. et KELTNER, D. (2004). Brief report the coherence of emotion systems : Comparing “on-line” measures of appraisal and facial expressions, and self-report. *Cognition and Emotion*, 18(3):431–444. 31
- BOUVIER, P. (2009). *Presence in virtual reality, a user centered approach*. Theses, Université Paris-Est. 12, 13, 14, 69
- BOUVIER, P., CHAUDEYRAC, P., SOUEINA, S., KISS, J. et ELMAGHRABY, A. S. E. (2007). Intentionality analysis in 3d games. *In Proceedings of the 10th International Conference on Computer Games : AI, Animation, Mobile, Educational and Serious Games*, CGAMES'07, pages 39–43, Louisville, Kentucky, USA, France. 43, 51
- 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. 26
- BROCKMYER, J. H., FOX, C. M., CURTISS, K. A., MCBROOM, E., BURKHART, K. M. et PIDRUZNY, J. N. (2009). The development of the game engagement questionnaire : A measure of engagement in video game-playing. *Journal of Experimental Social Psychology*, 45(4):624 – 634. 19, 21, 63, 64
- BURDEA, G. C. et COIFFET, P. (2003). *Virtual Reality Technology*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2 édition. 14
- CACIOPPO, J. T., TASSINARY, L. G. et BERNTSON, G. (2007). *Handbook of psychophysiology*. Cambridge University Press. 26
- CHEN, H., DEY, A., BILLINGHURST, M. et LINDEMAN, R. W. (2017). Exploring the design space for multi-sensory heart rate feedback in immersive virtual reality. *In Proceedings of the 29th Australian Conference on Computer-Human Interaction*, OZCHI '17, pages 108–116, New York, NY, USA. ACM. 42
- CLYNES, M. (1960). Respiratory sinus arrhythmia : laws derived from computer simulation. *Journal of Applied Physiology*, 15(5):863–874. 33, 52, 95

- COSTA, J., ADAMS, A. T., JUNG, M. F., GUIMBRETIERE, F. et CHOUDHURY, T. (2016). Emotioncheck : Leveraging bodily signals and false feedback to regulate our emotions. *In Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '16*, pages 758–769, New York, NY, USA. ACM. 38
- COWIE, R., DOUGLAS-COWIE, E., TSAPATSOU LIS, N., VOTSIS, G., KOLLIAS, S., FELLE NZ, W. et TAYLOR, J. G. (2001). Emotion recognition in human-computer interaction. *IEEE Signal Processing Magazine*, 18(1):32–80. 26
- CRAIG, A. B. (2003). Interoception : the sense of the physiological condition of the body. *Current Opinion in Neurobiology*, 13(4):500 – 505. 31
- CSIKSZENTMIHALYI, M. (1975). *Beyond Boredom and Anxiety*. The Jossey-Bass behavioral science series. Jossey-Bass Publishers. 18, 123
- D. SPIELBERGER, C., GORSUCH, R., E. LUSHENE, R., VAGG, P. et A. JACOBS, G. (1983). Manual for the state-trait anxiety inventory (form Y1 – Y2). 27, 29
- da SILVA, G. A., NOGUEIRA, P. A. et RODRIGUES, R. (2014). Multimodal vs. unimodal biofeedback in videogames : An empirical player study using a first-person shooter. *In 2014 9th Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI '14*, pages 1–6. 35, 38, 39, 122
- DARWIN, C. (1872). *The Expression of the Emotions in Man and Animals*. The original was published 1898 by Appleton, New York. Reprinted 1965 by the University of Chicago Press, Chicago and London,. 25
- DATTA, S. K. et COUGHLIN, T. (2016). An iot architecture enabling digital senses. *In 2016 IEEE 6th International Conference on Consumer Electronics - Berlin, ICCE-Berlin '16*, pages 67–68. 50
- DAVIES, C. T. et NEILSON, J. M. (1967). Sinus arrhythmia in man at rest. *Journal of Applied Physiology*, 22(5):947–955. 33
- DAWSON, M. E., SCHELL, A. M. et FILION, D. L. (2007). The electrodermal system. *Handbook of psychophysiology*, 2:200–223. 26
- DE GOOD, D. E. et ADAMS, A. S. (1976). Control of cardiac response under aversive stimulation. *Biofeedback and Self-regulation*, 1(4):373–385. 34

- DEBARBA, H. G., MOLLA, E., HERBELIN, B. et BOULIC, R. (2015). Characterizing embodied interaction in first and third person perspective viewpoints. *In 2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, IEEE 3DUI '15, pages 67–72. 64
- DEKKER, A. et CHAMPION, E. (2007). Please biofeed the zombies : Enhancing the gameplay and display of a horror game using biofeedback. *In DiGRA Conference*. 39, 43, 52, 73, 87, 88, 97, 122, 125, 135
- DETANDT, S., LEYS, C. et BAZAN, A. (2017). A french translation of the Pleasure Arousal Dominance (PAD) semantic differential scale for the measure of affect and drive. *Psychologica Belgica*, 57(1):17–31. 25
- DEY, A., PIUMSOMBOON, T., LEE, Y. et BILLINGHURST, M. (2017). Effects of sharing physiological states of players in a collaborative virtual reality gameplay. *In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pages 4045–4056, New York, NY, USA. ACM. 41, 43, 69, 72, 88, 125, 135
- DIEMER, J., ALPERS, G. W., PEPPERKORN, H. M., SHIBAN, Y. et MÜHLBERGER, A. (2015). The impact of perception and presence on emotional reactions : a review of research in virtual reality. *Frontiers in Psychology*, 6:26. 14
- DIMOKA, A., DAVIS, F. D. et vom BROCKE, J. (2012). On the use of neurophysiological tools in IS research : Developing a research agenda for NeuroIS 1. *In MIS Quarterly*, volume 36, pages 679–702. 26
- DUNN, B. D., GALTON, H. C., MORGAN, R., EVANS, D., OLIVER, C., MEYER, M., CUSACK, R., LAWRENCE, A. D. et DALGLEISH, T. (2010). Listening to your heart : How interoception shapes emotion experience and intuitive decision making. *Psychological Science*, 21(12): 1835–1844. 31
- EKMAN, P. (2003). *Emotions Revealed : Recognizing Faces and Feelings to Improve Communication and Emotional Life*. Henry Holt and Company. 25
- EVANS, D. (2011). The internet of things : How the next evolution of the internet is changing everything. *CISCO white paper*, 1(2011):1–11. 2, 130
- FARRER, C. et FRITH, C. D. (2002). Experiencing oneself vs another person as being the cause of an action : the neural correlates of the experience of agency. *Neuroimage*, 15(3):596–603. 23
- FEDEROFF, M. A. (2002). Heuristics and usability guidelines for the creation and evaluation of fun in video games. Mémoire de D.E.A., Indiana University, Bloomington. 20

- FERREIRA, J., BRÁS, S., SILVA, C. F. et SOARES, S. C. (2016). An automatic classifier of emotions built from entropy of noise. *Psychophysiology*, 54(4):620–627. 27
- FLOWERS, A. (2018). *Virtual Environments for the Induction of Action*. Thèse de doctorat, The University of Rhode Island. 40, 43
- GALLAGHER, I. (2000). Philosophical conceptions of the self : implications for cognitive science. *Trends in cognitive sciences*, 4(1):14–21. 23
- GALLAGHER, S. (2012). Multiple aspects in the sense of agency¹. *New Ideas in Psychology*, 30(1):15 – 31. 23
- GASKIN, J., JENKINS, J., MESERVY, T., STEFFEN, J. et PAYNE, K. (2017). Using wearable devices for non-invasive, inexpensive physiological data collection. *In Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences*. 46, 69
- GESLIN, E. (2013). *Process of inducing emotions in virtual environments and video games*. Theses, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM. 12, 14, 15, 52, 69
- GILLEADE, K. M., DIX, A. et ALLANSON, J. (2005). Affective videogames and modes of affective gaming : Assist me, challenge me, emote me. *In DiGRA '05 - Proceedings of the 2005 DiGRA International Conference : Changing Views : Worlds in Play*. 36, 52, 88, 90, 125
- GLAS, N. et PELACHAUD, C. (2015). Definitions of engagement in human-agent interaction. *In 2015 International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction, ACII '15*, pages 944–949. 18
- GOFFMAN, E. (1966). *Behavior in Public Spaces : Notes on the Social Organization of Gatherings*. Simon and Schuster. 18
- GOLDSTEIN, D. S., ROSS, R. S. et BRADY, J. V. (1977). Biofeedback heart rate training during exercise. *Biofeedback and Self-regulation*, 2(2):107–125. 34
- GORISSE, G., CHRISTMANN, O., AMATO, E. A. et RICHIR, S. (2017). First- and third-person perspectives in immersive virtual environments : Presence and performance analysis of embodied users. *Frontiers in Robotics and AI*, 4:33. 64, 113
- GORISSE, G., CHRISTMANN, O. et RICHIR, S. (2018). De la présence à l'incarnation, proposition d'un méta-modèle pour la réalité virtuelle. *In Formes et dynamiques d'attention, de présence et d'engagements*, volume 7, chapitre 5, pages 94–114. Interfaces numériques journal, interfaces numériques édition. xxi, 22, 23

- GRADL, S., WIRTH, M., ZILLIG, T. et ESKOFIER, B. M. (2018). Visualization of heart activity in virtual reality : A biofeedback application using wearable sensors. *In 2018 IEEE 15th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, IEEE BSN '18*, pages 152–155. 42
- GREEN, E. E., GREEN, A. M. et WALTERS, E. D. (1970). Voluntary control of internal states : Psychological and physiological. *Journal of Transpersonal Psychology*, 9(1):1–26. 31
- GREGOR, S., LIN, A. C. H., GEDEON, T., RIAZ, A. et ZHU, D. (2014). Neuroscience and a nomological network for the understanding and assessment of emotions in information systems research. *Journal of Management Information Systems*, 30(4):13–48. 26
- GROENEGRESS, C., SPANLANG, B. et SLATER, M. (2010). The physiological mirror—a system for unconscious control of a virtual environment through physiological activity. *The Visual Computer*, 26(6):649–657. 53, 107
- GROSSMAN, P. (1983). Respiration, stress, and cardiovascular function. *Psychophysiology*, 20(3):284–300. 33
- HALL, L., WOODS, S., AYLETT, R., NEWALL, L. et PAIVA, A. (2005). Achieving empathic engagement through affective interaction with synthetic characters. *In Affective Computing and Intelligent Interaction*, pages 731–738, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg. 18
- HÄNSEL, K., POGUNTKE, R., HADDADI, H., ALOMAINY, A. et SCHMIDT, A. (2018). What to put on the user : Sensing technologies for studies and physiology aware systems. *In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, pages 145 :1–145 :14, New York, NY, USA. ACM. xxi, 46, 47, 69, 132
- HASSENZAHL, M., BURMESTER, M. et KOLLER, F. (2003). *AttrakDiff : A questionnaire to measure perceived hedonic and pragmatic quality*, pages 187–196. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden. 63, 64
- HASSENZAHL, M., DIEFENBACH, S. et GÖRITZ, A. (2010). Needs, affect, and interactive products - facets of user experience. *Interacting with Computers*, 22(5):353–362. 19, 63
- HE, C., YAO, Y.-j. et YE, X.-s. (2016). An emotion recognition system based on physiological signals obtained by wearable sensors. *In Wearable Sensors and Robots*, pages 15–25, Singapore. Springer Singapore. 27, 47, 132

- HOLMES, D. S., SOLOMON, S. et BUCHSBAUM, H. K. (1979). Utility of voluntary control of respiration and biofeedback for increasing and decreasing heart rate. *Psychophysiology*, 16(5):432–437. 34
- IRWIN, H. J. (1999). Pathological and nonpathological dissociation : The relevance of childhood trauma. *The Journal of Psychology*, 133(2):157–164. PMID : 10188264. 19
- JEUNET, C., ALBERT, L., ARGELAGUET, F. et LÉCUYER, A. (2018). “do you feel in control ?” : Towards novel approaches to characterise, manipulate and measure the sense of agency in virtual environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(4):1486–1495. 23, 24, 42, 53, 126
- JUN, J., JUNG, M., KIM, S.-Y. et KIM, K. K. (2018). Full-body ownership illusion can change our emotion. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pages 601 :1–601 :11, New York, NY, USA. ACM. 16
- JUNIPER RESEARCH (2013). Smart wearable devices. fitness, healthcare, entertainment & enterprise 2013-2018. <https://www.juniperresearch.com/researchstore/smart-devices/consumer-wearables-market-survey-archive>. cité : 2014-10-30. 2, 45
- JÄRVELÄ, S., KÄTSYRI, J., RAVAJA, N., CHANEL, G. et HENTTONEN, P. (2016). Intragroup emotions : Physiological linkage and social presence. *Frontiers in Psychology*, 7:105. 31
- KALANSOORIYA, P., MITSUI, Y., TAKAKI, S., KINEFUCHI, M., TAKAHASHI, A. et NOMURA, S. (2016). The effect of a bio-signal interactive virtual reality on subjective impression - a preliminary study. *International Journal of Affective Engineering*, 15(3):317–323. 39
- KETCHESON, M., YE, Z. et GRAHAM, T. N. (2015). Designing for exertion : How heart-rate power-ups increase physical activity in exergames. In *Proceedings of the 2015 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, CHI PLAY '15, pages 79–89, New York, NY, USA. ACM. 122
- KILTENI, K., GROTEN, R. et SLATER, M. (2012). The sense of embodiment in virtual reality. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 21(4):373–387. 22, 52, 125, 126
- KIVIKANGAS, J. M., CHANEL, G., COWLEY, B., EKMAN, I., SALMINEN, M., JÄRVELÄ, S. et RAVAJA, N. (2011). A review of the use of psychophysiological methods in game research. *Journal of Gaming & Virtual Worlds*, 3(3):181–199. 28
- KUIKKANIEMI, K., LAITINEN, T., TURPEINEN, M., SAARI, T., KOSUNEN, I. et RAVAJA, N. (2010). The influence of implicit and explicit biofeedback in first-person shooter games.

- In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '10*, pages 859–868, New York, NY, USA. ACM. 39, 43
- KWAY, L. et MITCHELL, A. (2018). Emotional agency in storygames. *In Proceedings of the 13th International Conference on the Foundations of Digital Games, FDG '18*, pages 21 :1–21 :10, New York, NY, USA. ACM. 21
- LANG, P. J., BRADLEY, M. M. et CUTHBERT, B. N. (1990). Emotion, attention, and the startle reflex. *Psychol Rev*, 97(3):377–395. 25
- LANG, P. J., GREENWALD, M. K., BRADLEY, M. M. et HAMM, A. O. (1993). Looking at pictures : Affective, facial, visceral, and behavioral reactions. *Psychophysiology*, 30(3):261–273. 26
- LARKIN, K. T., MANUCK, S. B. et KASPROWICZ, A. L. (1989). Heart rate feedback-assisted reduction in cardiovascular reactivity to a videogame challenge. *The Psychological Record*, 39(3):365–371. 34
- LARKIN, K. T., MANUCK, S. B. et KASPROWICZ, A. L. (1990). The effect of feedback-assisted reduction in heart rate reactivity on videogame performance. *Biofeedback and Self-regulation*, 15(4):285–303. 34, 95, 107
- LAURA, E. et FRANS, M. (2005). Fundamental components of the gameplay experience : Analysing immersion. *In DiGRA '05 - Proceedings of the 2005 DiGRA International Conference : Changing Views : Worlds in Play*. 39
- LECOMTE, J. (2004). Les applications du sentiment d'efficacité personnelle. *Savoirs*, 5:59–90. 32
- LEE, K. M. (2004). Presence, explicated. *Communication Theory*, 14(1):27–50. 16, 22
- LESSITER, J., FREEMAN, J., KEOGH, E. et DAVIDOFF, J. (2001). A cross-media presence questionnaire : The ITC-sense of presence inventory. *Presence*, 10(3):282–297. 20, 51, 69, 125, 126
- LEVY, L., LAMBETH, A., SOLOMON, R. et GANDY, M. (2018). Method in the madness : The design of games as valid and reliable scientific tools. *In Proceedings of the 13th International Conference on the Foundations of Digital Games, FDG '18*, pages 9 :1–9 :10, New York, NY, USA. ACM. 60

- LI, Y., ELMAGHRABY, A. S., EL-BAZ, A. et SOKHADZE, E. M. (2015). Using physiological signal analysis to design affective vr games. *In 2015 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, IEEE ISSPIT '15, pages 57–62. 52, 69
- LIKERT, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 22:55. 61
- LIMERICK, H., COYLE, D. et MOORE, J. W. (2014). The experience of agency in human-computer interactions : a review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8:643. 22
- LOBEL, A., GOTSIS, M., REYNOLDS, E., ANNETTA, M., ENGELS, R. C. et GRANIC, I. (2016). Designing and utilizing biofeedback games for emotion regulation : The case of nevermind. *In Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, pages 1945–1951, New York, NY, USA. ACM. 40, 72, 130
- LOMBARD, M. et DITTON, T. (1997). At the heart of it all : The concept of presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2):0–0. 12, 13
- LUM, H. C., GREATBATCH, R., WALDFOGLE, G. et BENEDICT, J. (2018). How immersion, presence, emotion, & workload differ in virtual reality and traditional game mediums. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 62(1):1474–1478. 12
- LUX, E., ADAM, M. T. P., DORNER, V., HELMING, S., KNIERIM, M. T. et WEINHARDT, C. (2018). Live biofeedback as a user interface design element : A review of the literature. *Communications of the Association for Information Systems*, 43. 31
- M. BERNSTEIN, E. et W. PUTNAM, F. (1986). Development, reliability, and validity of a dissociation scale. *The Journal of nervous and mental disease*, 174:727–735. 19
- MADHURI, S., DORATHI JAYASHEELI, J., MALATHI, D. et SENTHILKUMAR, K. (2017). Electrodermal activity (EDA) based wearable device for quantifying normal and abnormal emotions in humans. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(12). 26
- MAHALIL, I., RUSLI, M. E. et YUSOF, A. M. (2017). Integration of a heart rate monitoring system in a virtual reality relaxation therapy for supporting an immersion level measuring technique. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(39). 30
- MAISTER, L., SLATER, M., SANCHEZ-VIVES, M. V. et TSAKIRIS, M. (2015). Changing bodies changes minds : owning another body affects social cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(1):6 – 12. 16

- MALCUIT, G. et BEAUDRY, J. (1980). Voluntary heart rate lowering following a cardiovascular arousing task. *Biological Psychology*, 10(3):201 – 210. 33, 34
- MANIA, K. et CHALMERS, A. (2001). The effects of levels of immersion on memory and presence in virtual environments : A reality centered approach. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2):247–264. 19
- MANUCK, S. B., LEVENSON, R. W., HINRICHSSEN, J. J. et GRYLL, S. L. (1975). Role of feedback in voluntary control of heart rate. *Perceptual and Motor Skills*, 40(3):747–752. 33, 97, 136
- MARÍN-MORALES, J., HIGUERA-TRUJILLO, J. L., GRECO, A., GUIXERES, J., LLINARES, C., SCILINGO, E. P., ALCANIZ, M. et VALENZA, G. (2018). Affective computing in virtual reality : emotion recognition from brain and heartbeat dynamics using wearable sensors. *Scientific Reports*, 8(1):jzy025. 49, 132
- MASLOW, A. H. (1943). A theory of human motivation. *Psychological Review*, 50(4):430–437. 25
- MATEAS, M. (2001). A preliminary poetics for interactive drama and games. *Digital Creativity*, 12(3):140–152. 21
- MATEAS, M. et STERN, A. (2010). Structuring content in the façade interactive drama architecture. In *Proceedings of the First AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment, AIIDE'05*, pages 93–98. AAAI Press. 21
- MAUSS, I. B., LEVENSON, R. W., MCCARTER, L., WILHELM, F. H. et GROSS, J. J. (2005). The tie that binds? Coherence among emotion experience, behavior, and physiology. *Emotion*, 5(2):175–190. 31
- MAUSS, I. B. et ROBINSON, M. D. (2009). Measures of emotion : A review. *Cognition and Emotion*, 23(2):209–237. 28
- MCCANNE, T. R. (1983). Changes in autonomic responding to stress after practice at controlling heart rate. *Biofeedback and Self-regulation*, 8(1):9–24. 34
- MCCMAHAN, A. (2003). Immersion, Engagement, and Presence : A Method for Analyzing 3D Videogames. In *The Video Game Theory Reader*, pages 67–86. Routledge. 13
- MEHRABIAN, A. et RUSSEL, J. A. (1974). *An approach to environmental psychology*. MIT Press. 25

- MIKROPOULOS, T. A. et STROUBOULIS, V. (2004). Factors that influence presence in educational virtual environments. *CyberPsychology & Behavior*, 7(5):582–591. PMID : 15667053. 19
- MIRANDA, J. A., CANABAL, M. F., GARCÍA, M. P. et LOPEZ-ONGIL, C. (2018). Embedded emotion recognition : Autonomous multimodal affective internet of things. In *Proceedings of the Cyber-Physical Systems PhD & Postdoc Workshop*, volume 2208, pages 22–29. 48, 132
- MIRZA-BABAEI, P., LONG, S. et FOLEY, E. (2011). Understanding the contribution of biometrics to games user research. In *DiGRA & #3911 - Proceedings of the 2011 DiGRA International Conference : Think Design Play*. DiGRA/Utrecht School of the Arts. 26, 28, 52, 69
- MOGHIMI, M., STONE, R. et ROTSHEIN, P. (2017). A psychophysiological evaluation of an effective recognition technique using interactive dynamic virtual environments. *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, 11(5):571 – 579. 29
- MOGHIMI, M., STONE, R., ROTSHEIN, P. et COOKE, N. (2016). Influencing human affective responses to dynamic virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 25(2):81–107. 14, 15, 16
- MUKHOPADHYAY, S. C. (2015). Wearable sensors for human activity monitoring : A review. *IEEE Sensors Journal*, 15(3):1321–1330. 46
- MUÑOZ, J., RUBIO, E., CAMEIRAO, M. et BERMÚDEZ, S. (2017). The biocybernetic loop engine : an integrated tool for creating physiologically adaptive videogames. In *Proceedings of the 4th International Conference in Physiological Computing Systems*. 49, 132
- MURIS, P. (2001). A brief questionnaire for measuring self-efficacy in youths. *Journal of Psychopathology and Behavioral Assessment*, 23(3):145–149. 33, 41
- MURPHY, D. J. (2016). Spatial presence, psychophysiology, and game(play) emotions. In *DiGRA/FDG & #3916 - Abstract Proceedings of the First International Joint Conference of DiGRA and FDG*, Dundee, Scotland. Digital Games Research Association and Society for the Advancement of the Science of Digital Games. 14, 135
- MURRAY, C. D., FOX, J. et PETTIFER, S. (2007). Absorption, dissociation, locus of control and presence in virtual reality. *Computers in Human Behavior*, 23(3):1347 – 1354. Including

- the Special Issue : Avoiding Simplicity, Confronting Complexity : Advances in Designing Powerful Electronic Learning Environments. 53
- MURRAY, J. H. (1997). *Hamlet on the Holodeck : The Future of Narrative in Cyberspace*. MIT Press. 21
- MUÑOZ, J., GONÇALVES, A., VIEIRA, T., CRÓ, D., CHISIK, Y. et Bermúdez i BADIA, S. (2016a). Space connection - a multiplayer collaborative biofeedback game to promote empathy in teenagers : A feasibility study. *In Proceedings of the 3rd International Conference on Physiological Computing Systems*, pages 88–97. 40
- MUÑOZ, J. E., PAULINO, T., VASANTH, H. et BARAS, K. (2016b). Physiovr : A novel mobile virtual reality framework for physiological computing. *In 2016 IEEE 18th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services, IEEE Healthcom '16*, pages 1–6. 49, 87, 132
- MYRONIV, B., WU, C.-W., REN, Y., CHRISTIAN, A., BAJO, E. et TSENG, Y.-c. (2017). Analyzing user emotions via physiology signals. data science and pattern recognition. *In Data Science and Pattern Recognition*, volume 1. 27, 47
- NACKE, L. E., KALYN, M., LOUGH, C. et MANDRYK, R. L. (2011). Biofeedback game design : Using direct and indirect physiological control to enhance game interaction. *In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11*, pages 103–112, New York, NY, USA. ACM. 35, 37, 38, 43, 52, 88, 122, 125, 130, 135
- NAKASONE, A., PRENDINGER, H. et ISHIZUKA, M. (2005). Emotion recognition from electromyography and skin conductance. *In The Fifth International Workshop on Biosignal Interpretation, BSI '05*, pages 219–222. 27
- NOGUEIRA, P. A., TORRES, V., RODRIGUES, R., OLIVEIRA, E. et NACKE, L. E. (2016). Vanishing scares : biofeedback modulation of affective player experiences in a procedural horror game. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 10(1):31–62. 37, 73, 97, 130
- O'BRIEN, H. L. et TOMS, E. (2008). What is user engagement ? A conceptual framework for defining user engagement with technology. *JASIST*, 59:938–955. 12, 18, 63, 69
- O'BRIEN, H. L. et TOMS, E. G. (2010). The development and evaluation of a survey to measure user engagement. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 61(1):50–69. 19, 63

- OHMOTO, Y., TAKEDA, S. et NISHIDA, T. (2017). Effect of visual feedback caused by changing mental states of the avatar based on the operator's mental states using physiological indices. *In Intelligent Virtual Agents*, pages 315–324, Cham. Springer International Publishing. 41
- OREFICE, P.-H., AMMI, M., HAFEZ, M. et TAPUS, A. (2017). Design of an emotion elicitation tool using vr for human-avatar interaction studies. *In Intelligent Virtual Agents*, pages 335–338, Cham. Springer International Publishing. 17
- OSGOOD, C. E. (1962). Studies on the generality of affective meaning system. *Amer.Psychologist*, 17:10–28. 61
- OSIMO, S. A., PIZARRO, R., SPANLANG, B. et SLATER, M. (2015). Conversations between self and self as Sigmund Freud—A virtual body ownership paradigm for self counselling. *Scientific Reports*, 5. 141
- PANTELOPOULOS, A. et BOURBAKIS, N. (2008). A survey on wearable biosensor systems for health monitoring. *In 2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pages 4887–4890. 46
- PARNANDI, A. et GUTIERREZ-OSUNA, R. (2015). A comparative study of game mechanics and control laws for an adaptive physiological game. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 9(1):31–42. 37
- PARNANDI, A. et GUTIERREZ-OSUNA, R. (2018). Visual biofeedback and game adaptation in relaxation skill transfer. *IEEE Transactions on Affective Computing*, pages 1–1. 40, 130
- PATEL, S., PARK, H., BONATO, P., CHAN, L. et RODGERS, M. (2012). A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 9(1):21. 46
- PEIRA, N., FREDRIKSON, M. et POURTOIS, G. (2014). Controlling the emotional heart : Heart rate biofeedback improves cardiac control during emotional reactions. *International Journal of Psychophysiology*, 91(3):225 – 231. 34
- PERSKI, A. et ENGEL, B. T. (1980). The role of behavioral conditioning in the cardiovascular adjustment to exercise. *Biofeedback and Self-regulation*, 5(1):91–104. 34
- PHAN, M. H., KEEBLER, J. R. et CHAPARRO, B. S. (2016). The development and validation of the Game User Experience Satisfaction Scale (GUESS). *Human Factors*, 58(8):1217–1247. PMID : 27647156. 19, 64, 113
- PICARD, R. W. (1995). Affective computing. 35

- PIUMSOMBOON, T., LEE, Y., LEE, G. A., DEY, A. et BILLINGHURST, M. (2017). Empathic mixed reality : Sharing what you feel and interacting with what you see. *In 2017 International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality, ISUVR '17*, pages 38–41. 43
- PIWEK, L., ELLIS, D. A., ANDREWS, S. et JOINSON, A. (2016). The rise of consumer health wearables : Promises and barriers. *PLOS Medicine*, 13(2):1–9. 45, 130
- POGGI, I. (2007). *Mind, Hands, Face and Body : A Goal and Belief View of Multimodal Communication*. Weidler. 18
- PRICE, M. et ANDERSON, P. (2007). The role of presence in virtual reality exposure therapy. *Journal of Anxiety Disorders*, 21(5):742 – 751. 14
- PRPA, M., TATAR, K., FRANÇOISE, J., RIECKE, B., SCHIPHORST, T. et PASQUIER, P. (2018). Attending to breath : Exploring how the cues in a virtual environment guide the attention to breath and shape the quality of experience to support mindfulness. *In Proceedings of the 2018 Designing Interactive Systems Conference, DIS '18*, pages 71–84, New York, NY, USA. ACM. 22, 42, 52, 105, 124
- RAINVILLE, P., BECHARA, A., NAQVI, N. et DAMASIO, A. R. (2006). Basic emotions are associated with distinct patterns of cardiorespiratory activity. *International Journal of Psychophysiology*, 61(1):5 – 18. Psychophysiology and Cognitive Neuroscience. 26
- RANI, P., SARKAR, N. et LIU, C. (2005). Maintaining optimal challenge in computer games through real-time physiological feedback. *In Proceedings of the 11th international conference on human computer interaction*, volume 58, pages 22–27. 36
- RAVAJA, N. (2004). Contributions of psychophysiology to media research : Review and recommendations. *Media Psychology*, 6(2):193–235. 26
- REIMER, K. M. et KHOSMOOD, F. (2016). Inducing emotional response in interactive media : A pilot study. *In Immersive Learning Research Network*, pages 122–131, Cham. Springer International Publishing. 17
- REINERMAN-JONES, L., HARRIS, J. et WATSON, A. (2017). Considerations for using fitness trackers in psychophysiology research. *In Human Interface and the Management of Information : Information, Knowledge and Interaction Design*, pages 598–606, Cham. Springer International Publishing. 46, 69, 132
- REISS, S., WILTZ, J. et SHERMAN, M. (2001). Trait motivational correlates of athleticism. *Personality and Individual Differences*, 30(7):1139 – 1145. 25

- RHEINBERG, F., VOLLMEYER, R. et ENGESER, S. (2003). Die erfassung des flow-erlebens. 28
- RIEDER, R., KRISTENSEN, C. H. et PINHO, M. S. (2017). Quality assessment of interaction techniques in immersive virtual environments using physiological measures. *In 2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference*, volume 1 de *COMPSAC '17*, pages 109–117. 29
- RIEDL, R., DAVIS, F. D. et HEVNER, A. R. (2014). Towards a neurois research methodology : Intensifying the discussion on methods, tools, and measurement. *Journal of the Association for Information Systems*, 15(11). 30
- RIEDL, R. et LÉGER, P.-M. (2016). *Fundamentals of NeuroIS : Information Systems and the Brain*. Springer. 31
- RINCON, J. A., COSTA, Â., NOVAIS, P., JULIAN, V. et CARRASCOSA, C. (2017). Using non-invasive wearables for detecting emotions with intelligent agents. *In International Joint Conference SOCO'16-CISIS'16-ICEUTE'16*, pages 73–84, Cham. Springer International Publishing. 48
- RINCON, J. A., JULIAN, V., CARRASCOSA, C., COSTA, A. et NOVAIS, P. (2018). Detecting emotions through non-invasive wearables. *Logic Journal of the IGPL*, page jzy025. 48
- RIVA, G., MANTOVANI, F., CAPIDEVILLE, C. S., PREZIOSA, A., MORGANTI, F., VILLANI, D., GAGGIOLI, A., BOTELLA, C. et ALCAÑIZ, M. (2007). Affective interactions using virtual reality : The link between presence and emotions. *CyberPsychology & Behavior*, 10(1):45–56. 14
- RYAN, R. M., RIGBY, C. S. et PRZYBYLSKI, A. (2006). The motivational pull of video games : A self-determination theory approach. *Motivation and Emotion*, 30(4):344–360. 19
- SALMINEN, M., JÄRVELÄ, S., RUONALA, A., TIMONEN, J., MANNERMAA, K., RAVAJA, N. et JACUCCI, G. (2018). Bio-adaptive social VR to evoke affective interdependence : DYNECOM. *In 23rd International Conference on Intelligent User Interfaces, IUI '18*, pages 73–77, New York, NY, USA. ACM. 41, 43, 105, 126, 137
- SANCHEZ-VIVES, M. V. et SLATER, M. (2005). From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(4):332–339. 22, 126
- SARKAR, A., ABBOTT, A. L. et DOERZAPH, Z. (2014). Assessment of psychophysiological characteristics using heart rate from naturalistic face video data. *In IEEE International Joint Conference on Biometrics*, pages 1–6. 33

- SATO, A. et YASUDA, A. (2005). Illusion of sense of self-agency : discrepancy between the predicted and actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership. *Cognition*, 94(3):241 – 255. 22
- SCHRADER, C., BRICH, J., FROMMEL, J., RIEMER, V. et ROGERS, K. (2017). *Rising to the Challenge : An Emotion-Driven Approach Toward Adaptive Serious Games*, pages 3–28. Springer International Publishing, Cham. 38, 43
- SHAREK, D. J. (2012). *Investigating Real-time Predictors of Engagement : Implications For Adaptive Video Games and Online Training*. Thèse de doctorat, North Carolina State University. 52
- SIDNER, C. L. et DZIKOVSKA, M. (2002). Human-robot interaction : engagement between humans and robots for hosting activities. In *Proceedings. Fourth IEEE International Conference on Multimodal Interfaces*, pages 123–128. 18
- SIRIBORVORNANAKUL, T. (2016). *A Study of Virtual Reality Headsets and Physiological Extension Possibilities*, pages 497–508. Springer International Publishing, Cham. 4, 49
- SIROTA, A. D., SCHWARTZ, G. E. et SHAPIRO, D. (1974). Voluntary control of human heart rate : effect on reaction to aversive stimulation. *Journal of Abnormal Psychology*, 83(3):261. 34
- SIROTA, A. D., SCHWARTZ, G. E. et SHAPIRO, D. (1976). Voluntary control of human heart rate : Effect on reaction to aversive stimulation : A replication and extension. *Journal of Abnormal Psychology*, 85(5):473. 34
- SLATER, M. (1999). Measuring presence : A response to the witmer and singer presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5):560–565. 63
- SLATER, M. (2003). A note on presence terminology. *Presence connect*, 3(3):1–5. 12, 13, 69
- SLATER, M. et STEED, A. (2000). A virtual presence counter. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5):413–434. 44
- SLATER, M., USOH, M. et STEED, A. (1994). Depth of presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2):130–144. 13
- SRA, M., XU, X. et MAES, P. (2018). Breathvr : Leveraging breathing as a directly controlled interface for virtual reality games. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pages 340 :1–340 :12, New York, NY, USA. ACM. 41, 43, 126

- SROUFE, L. A. (1971). Effects of depth and rate of breathing on heart rate and heart rate variability. *Psychophysiology*, 8(5):648–655. 5, 33, 52, 95, 97, 124, 136
- STACH, T., GRAHAM, T. C. N., YIM, J. et RHODES, R. E. (2009). Heart rate control of exercise video games. In *Proceedings of Graphics Interface 2009*, GI '09, pages 125–132, Toronto, Ont., Canada, Canada. Canadian Information Processing Society. 32, 112
- STEPHENS, J. H., HARRIS, A. H., BRADY, J. V. et SHAFFER, J. W. (1975). Psychological and physiological variables associated with large magnitude voluntary heart rate changes. *Psychophysiology*, 12(4):381–387. 33, 136
- STOERMER, R., MAGER, R., ROESSLER, A., MUELLER-SPAHN, F. et BULLINGER, A. H. (2000). Monitoring human-virtual reality interaction : A time series analysis approach. *CyberPsychology & Behavior*, 3(3):401–406. 26
- SYNOFZIK, M., VOSGERAU, G. et NEWEN, A. (2008). Beyond the comparator model : a multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and Cognition*, 17(1):219–239. 23
- TADAYON, R., AMRESH, A., MCDANIEL, T. et PANCHANATHAN, S. (2018). Real-time stealth intervention for motor learning using player flow-state. In *2018 IEEE 6th International Conference on Serious Games and Applications for Health*, IEEE SeGAH '18, pages 1–8. 38
- TAMBORINI, R. et SKALSKI, P. (2006). The role of presence in the experience of electronic games. *Playing video games : Motives, responses, and consequences*, pages 225–240. 19
- TAN, C. S. S., SCHÖNING, J., LUYTEN, K. et CONINX, K. (2014). Investigating the effects of using biofeedback as visual stress indicator during video-mediated collaboration. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pages 71–80, New York, NY, USA. ACM. 32
- TANENBAUM, K. et TANENBAUM, J. (2009). Commitment to meaning : a reframing of agency in games. In *Proceedings of the Digital Arts and Culture Conference*, DAC '09. 21
- TCHA-TOKEY, K., LOUP-ESCANDE, E., CHRISTMANN, O. et RICHIR, S. (2016). A questionnaire to measure the user experience in immersive virtual environments. In *Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference*, VRIC '16, pages 19 :1–19 :5, New York, NY, USA. ACM. xxi, 12, 13, 14, 136

- TSAKIRIS, M., PRABHU, G. et HAGGARD, P. (2006). Having a body versus moving your body : How agency structures body-ownership. *Consciousness and Cognition*, 15(2):423 – 432. 21
- TSAKIRIS, M., SCHÜTZ-BOSBACH, S. et GALLAGHER, S. (2007). On agency and body-ownership : Phenomenological and neurocognitive reflections. *Consciousness and Cognition*, 16(3):645 – 660. Subjectivity and the Body. 21
- UEOKA, R. et ALMUTAWA, A. (2018). Emotion hacking vr : Amplifying scary vr experience by accelerating actual heart rate. *In Human Interface and the Management of Information. Interaction, Visualization, and Analytics*, pages 436–445, Cham. Springer International Publishing. 38
- UEOKA, R. et ISHIGAKI, K. (2015). Development of the horror emotion amplification system by means of biofeedback method. *In Human Interface and the Management of Information. Information and Knowledge in Context*, pages 657–665, Cham. Springer International Publishing. 38
- VAN GORP, T. et ADAMS, E. (2012). *Design for emotion*. Elsevier. 16
- VENTURA, S., CEBOLLA, A., HERRERO, R. et MARIA BAÑOS, R. (2018). Qualitative research of an innovative virtual reality embodiment system : The machine to be another. *In Proceedings of the 12th international conference on Disability Virtual Reality and Associated Technologies, ICDVRAT '18*. 24
- VILLANI, D., ROTASPERTI, C., CIPRESSO, P., TRIBERTI, S., CARISSOLI, C. et RIVA, G. (2016). Assessing the emotional state of job applicants through a virtual reality simulation : A psycho-physiological study. *In eHealth 360°*, pages 119–126, Cham. Springer International Publishing. 29, 30
- WALMINK, W., WILDE, D. et MUELLER, F. F. (2013). Displaying heart rate data on a bicycle helmet to support social exertion experiences. *In Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, TEI '14*, pages 97–104, New York, NY, USA. ACM. 32
- WANG, R., BLACKBURN, G., DESAI, M. et et AL (2017). Accuracy of wrist-worn heart rate monitors. *JAMA Cardiology*, 2(1):104–106. 46, 62, 84, 87, 130, 132
- WATSON, D., CLARK, L. et TELLEGEN, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect : the panas scales. *Journal of personality and social psychology*, 54(6):1063–1070. 27

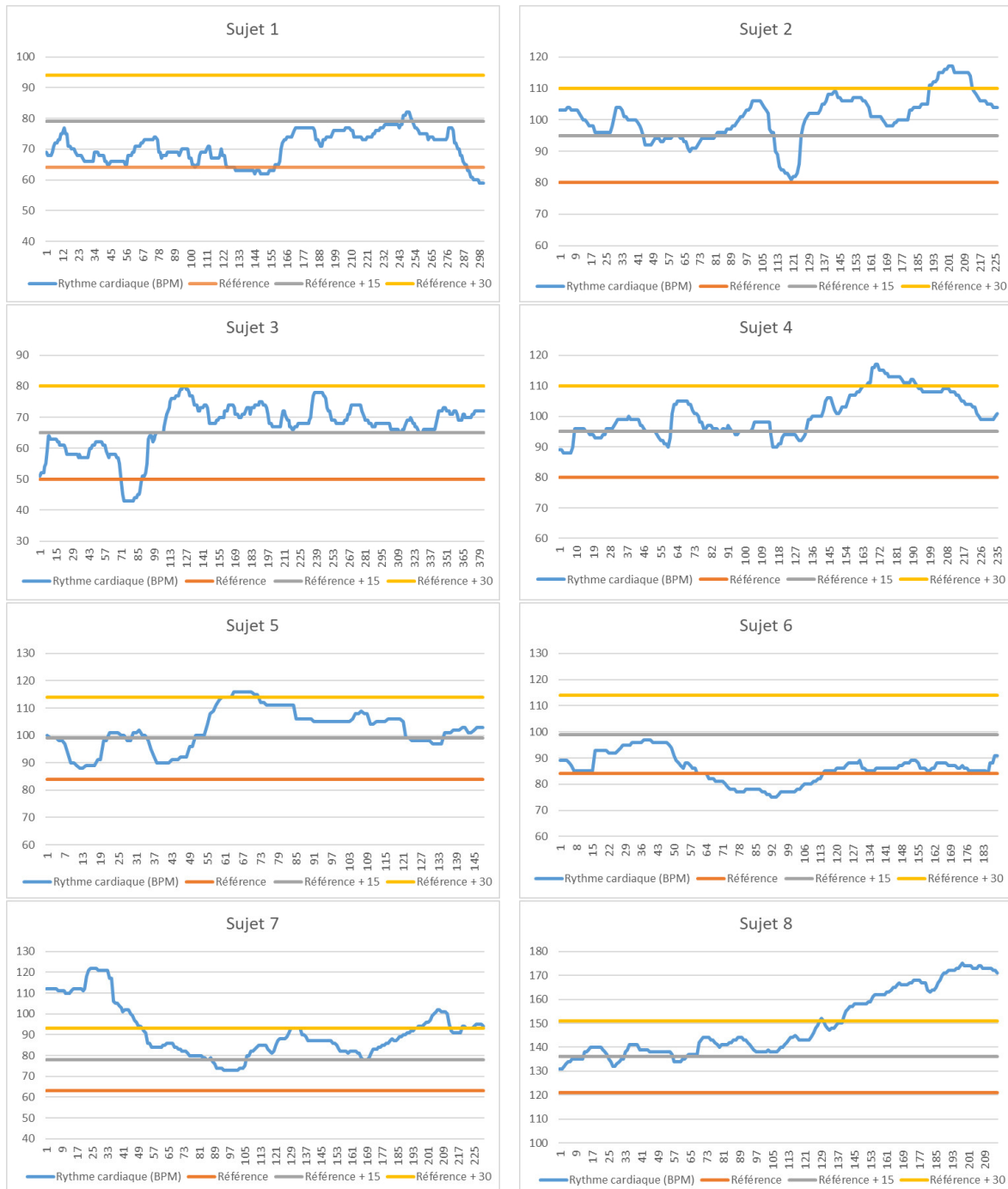
- WEERDMEESTER, J., van ROOIJ, M., HARRIS, O., SMIT, N., ENGELS, R. C. et GRANIC, I. (2017). Exploring the role of self-efficacy in biofeedback video games. In *Extended Abstracts Publication of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play, CHI PLAY '17 Extended Abstracts*, pages 453–461, New York, NY, USA. ACM. 22, 41, 42, 52, 105, 122, 124
- WEGNER, D. M. et WHEATLEY, T. (1999). Apparent mental causation. Sources of the experience of will. *The American Psychologist*, 54(7):480–492. 23
- WEIR, G. (2011). Analysis : Incidental character choices in *Balloon Diaspora*. https://www.gamasutra.com/view/news/124604/Analysis_Incidental_Character_Choices_in_Balloon_Diaspora.php. 21
- WEISER, M., GOLD, R. et BROWN, J. S. (1999). The origins of ubiquitous computing research at parc in the late 1980s. *IBM Systems Journal*, 38(4):693–696. 45
- WESTCOTT, M. R. et HUTTENLOCHER, J. (1961). Cardiac conditioning : The effects and implications of controlled and uncontrolled respiration. *Journal of Experimental Psychology*, 61(5):353. 33, 52, 95
- WHITEHEAD, W. E., DRESCHER, V. M., HEIMAN, P. et BLACKWELL, B. (1977). Relation of heart rate control to heartbeat perception. *Biofeedback and Self-regulation*, 2(4):371–392. 33
- WIEBE, E. N., LAMB, A., HARDY, M. et SHAREK, D. (2014). Measuring engagement in video game-based environments : Investigation of the user engagement scale. *Computers in Human Behavior*, 32:123 – 132. 19, 63, 64, 69, 75, 113
- WIEDERHOLD, B. K., JANG, D. P., KIM, S. I. et WIEDERHOLD, M. D. (2002). Physiological monitoring as an objective tool in virtual reality therapy. *CyberPsychology & Behavior*, 5(1):77–82. 26
- WINER, B. J. (1962). Statistical principles in experimental design. 116
- WITMER, B. G. et SINGER, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3):225–240. 63, 64, 75, 113
- WOLLMANN, T., ABTAHI, F., EGH DAM, A., SEOANE, F., LINDECRANTZ, K., HAAG, M. et KOCH, S. (2016). User-centred design and usability evaluation of a heart rate variability biofeedback game. *IEEE Access*, 4:5531–5539. 112, 124

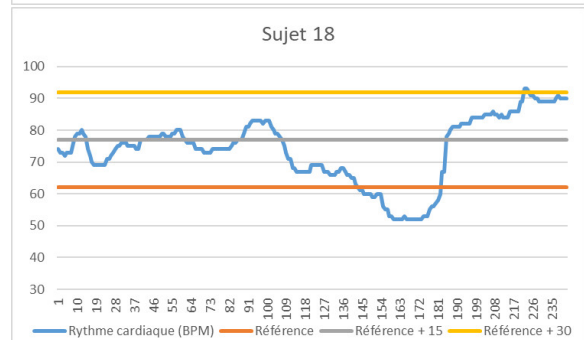
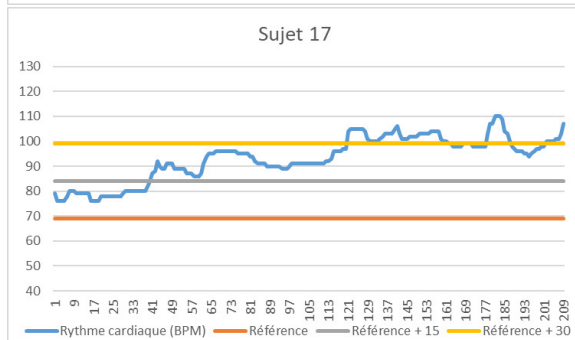
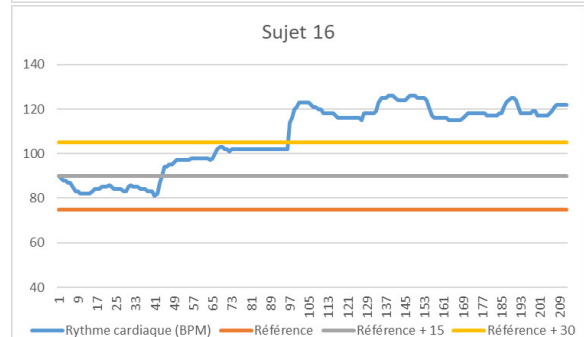
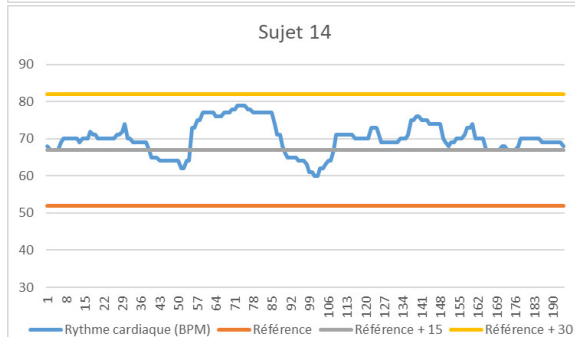
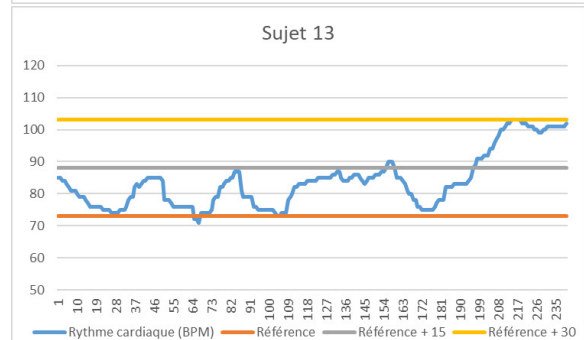
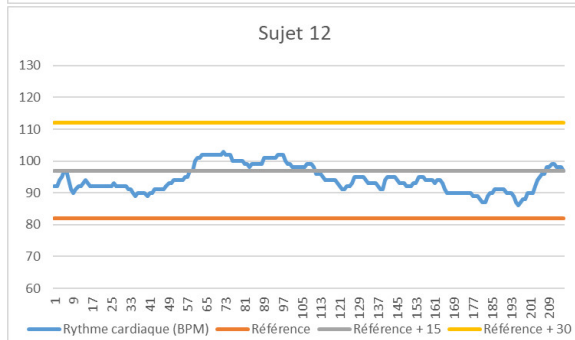
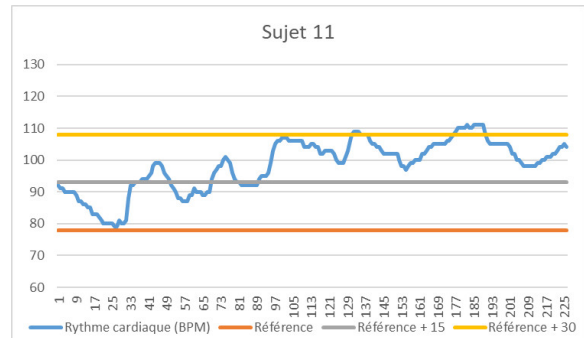
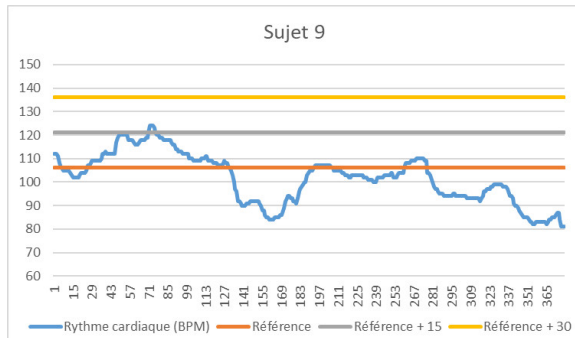
- YEE, N. et BAILENSEN, J. (2007). The proteus effect : The effect of transformed self-representation on behavior. *Human Communication Research*, 33(3):271–290. 141
- YU, C., AOKI, P. M. et WOODRUFF, A. (2004). Detecting User Engagement in Everyday Conversations. *eprint arXiv :cs/0410027*. 18
- ZAFAR, M. A., AHMED, B., AL-RIHAWI, R. et GUTIERREZ-OSUNA, R. (2018). Gaming away stress : Using biofeedback games to learn paced breathing. *IEEE Transactions on Affective Computing*, pages 1–1. 39, 43
- ZHANG, C., PERKIS, A. et ARNDT, S. (2017). Spatial immersion versus emotional immersion, which is more immersive? *In 2017 Ninth International Conference on Quality of Multimedia Experience, QoMEX '17*, pages 1–6. 16
- ZÜGER, M. et FRITZ, T. (2015). Interruptibility of software developers and its prediction using psycho-physiological sensors. *In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, pages 2981–2990, New York, NY, USA. ACM. 47, 87, 132

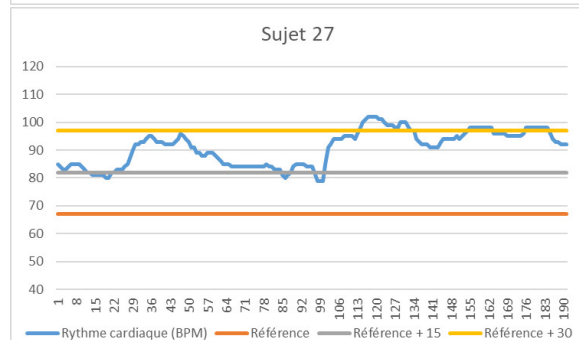
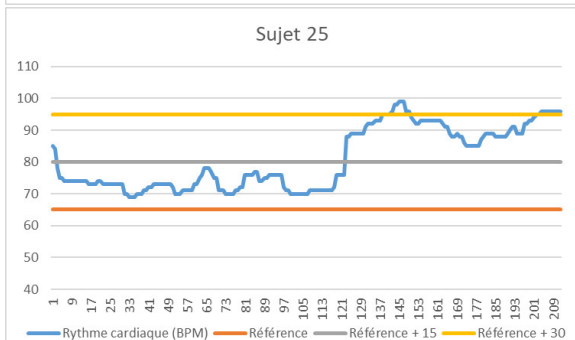
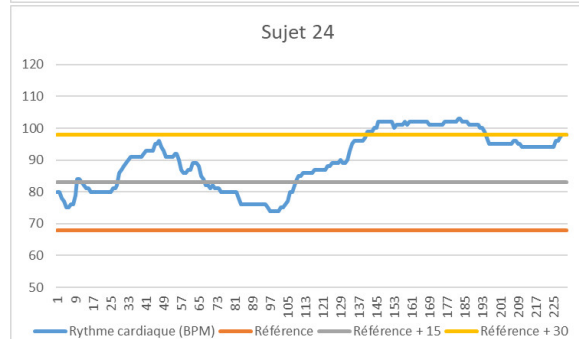
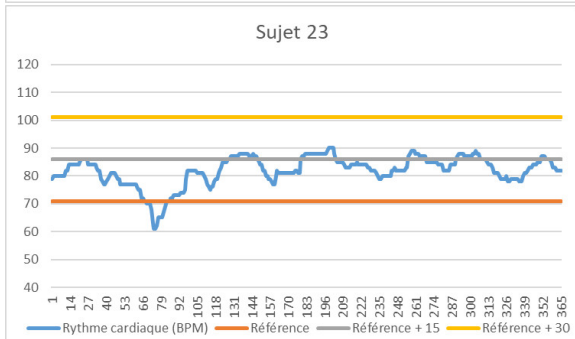
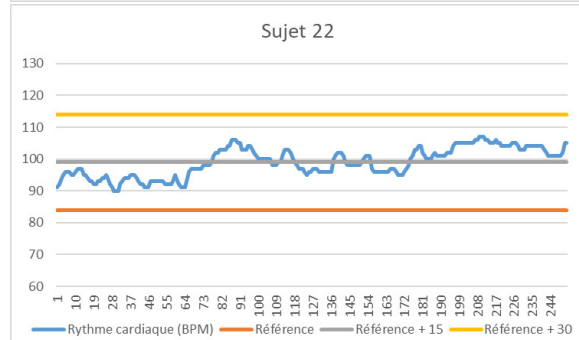
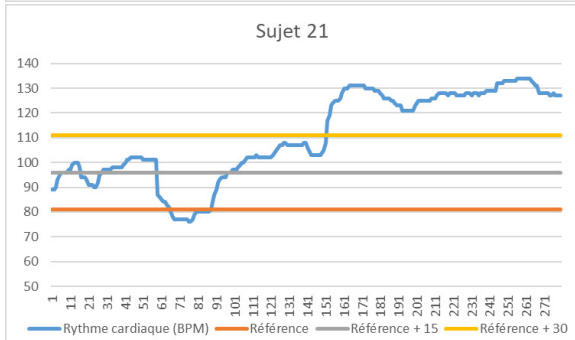
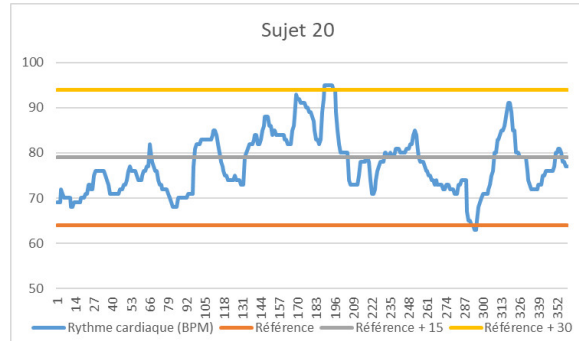
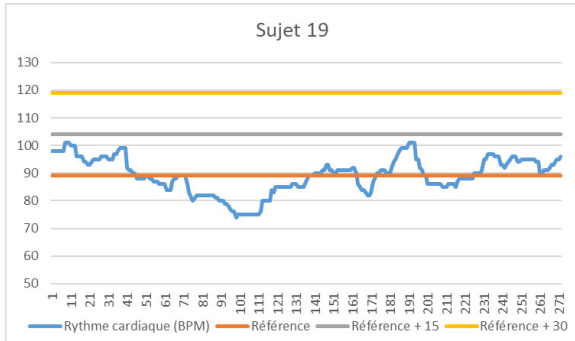
Annexe A

Annexes à l'expérimentation 1

A.1 Relevés cardiaques des participants lors de la passation avec *biofeedback*







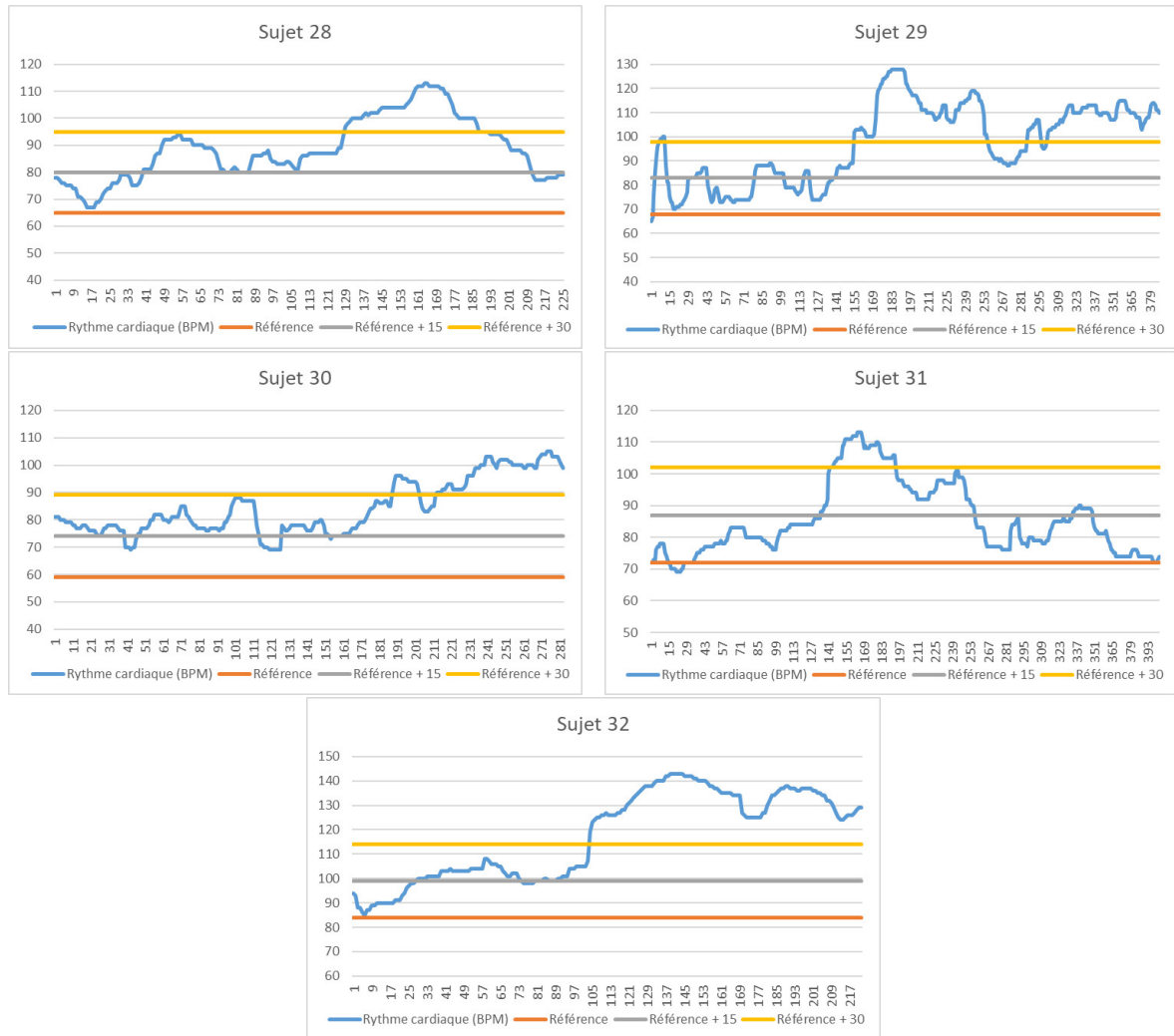


FIGURE A.4 – Graphiques représentant les relevés de rythme cardiaque (en BPM) des participants durant la passation avec rétroaction biologique. Rythme cardiaque (BPM) dans le temps (secondes).

A.2 Guide d'entretien post-passation

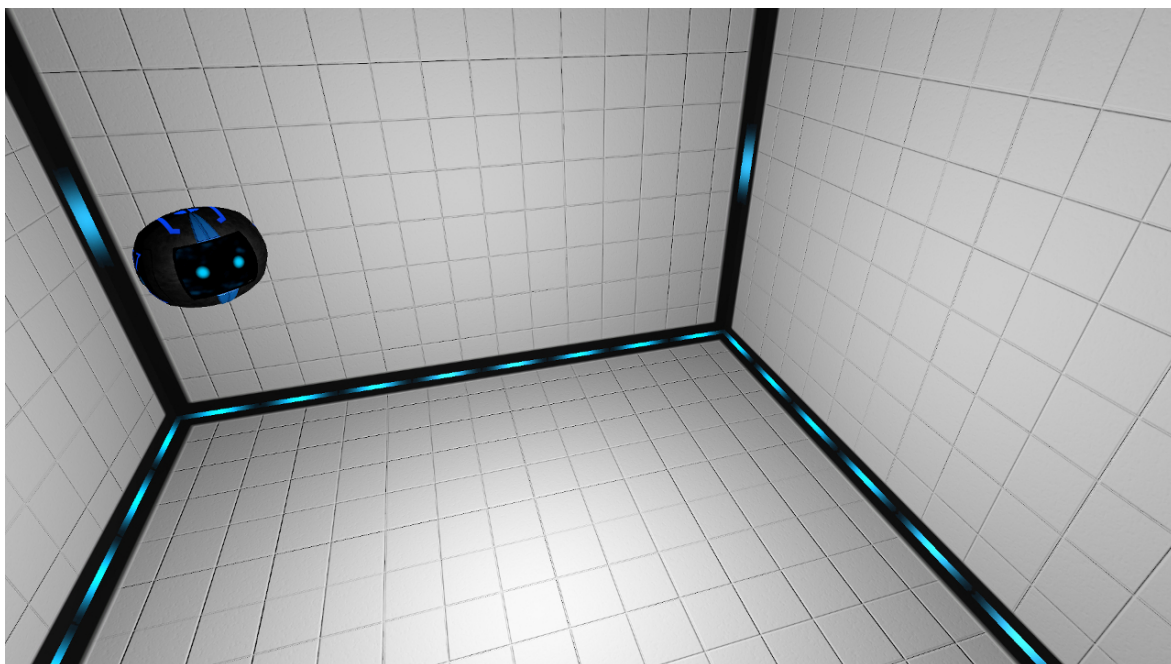
TABLEAU A.1 – Guide d'entretien post-passation de l'expérimentation 1.

ID	Question
1	Quelles sont tes impressions sur l'expérience que tu viens de vivre ?
2	As tu ressenti les éventuels changements de ton rythme cardiaque durant le jeu ?
3	Serais-tu intéressé par l'utilisation de ce type de mécaniques dans d'autre jeux ou d'autres types d'applications en réalité virtuelle à l'avenir ?
4	En matière de vie privée, est-ce que l'utilisation des données physiologiques te pose un problème ?

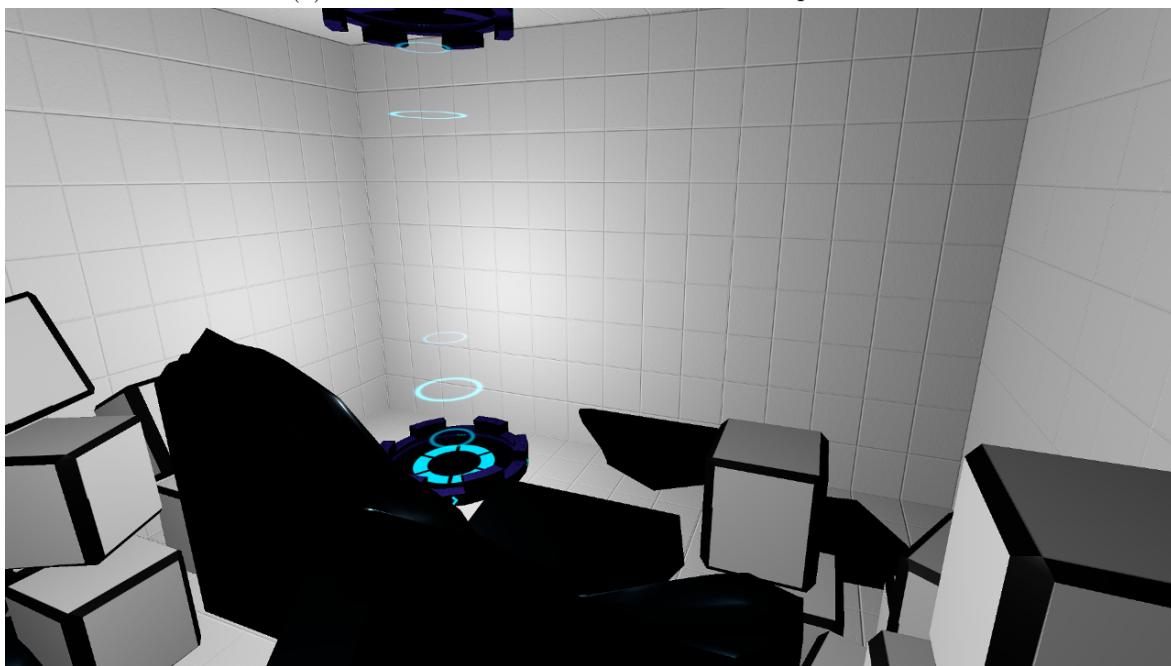
Annexe B

Annexes à l'expérimentation 2.2

B.1 Figures complémentaires



(a) Salle de transition entre les différentes épreuves.



(b) Salle H, après que le mur a été brisé.

FIGURE B.1 – Images des salles du jeu en réalité virtuelle développé pour la seconde étude.

B.2 Guide d'entretien post-passation

TABLEAU B.1 – Guide d'entretien post-passation de l'expérimentation 2.2.

ID	Question
1	Quels sont pour toi, personnellement, les apports de la série d'expériences que tu as vécue, la première phase sans réalité virtuelle et la seconde avec réalité virtuelle ?
2	En matière d'équilibrage de la difficulté, tu as trouvé que l'expérience était trop simple, trop compliquée ou que la difficulté devrait être pensée différemment ?
3	Dans l'expérience en réalité virtuelle, as-tu préféré la première ou la seconde passation ?
4	Par rapport à la première phase de cette expérience (sans réalité virtuelle), est-ce que tu penses que ta motivation a changé ? Si oui, est-ce que cela t'as aidé à mieux réussir le jeu ?

IMPACT SUR L'EXPERIENCE UTILISATEUR EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF DE L'UTILISATION D'OBJETS CONNECTES PORTES POUR LA RETROACTION PHYSIOLOGIQUE

RESUME :

De nombreux travaux dans le domaine de la réalité virtuelle rapportent l'exploitation des signaux physiologiques. Ceux-ci se basent principalement sur du matériel médical, qui possède des contraintes d'utilisation fortes, reste souvent encombrant et limite de fait la mobilité des utilisateurs. Pour tenter de pallier ces limites, nos travaux se concentrent donc sur l'utilisation originale des *wearables* (objets connectés portés) comme substituts aux capteurs physiologiques traditionnels dans le cadre d'applications immersives. Ce travail de thèse propose à la fois une réflexion fondamentale sur l'expérience utilisateur (UX) et une étude de faisabilité technologique. Dans ce contexte, l'objectif de nos recherches est de contribuer à la connaissance concernant l'impact de l'utilisation des données physiologiques dans des environnements virtuels immersifs. Nous étudierons en particulier l'influence d'un *biofeedback* cardiaque, via des capteurs connectés grand public, sur l'engagement utilisateur et le sentiment d'agentivité. Nous avons ainsi mené deux expérimentations nous permettant d'étudier l'impact des différentes modalités de *biofeedback* sur l'expérience utilisateur. Notre première expérimentation met en place un *biofeedback* cardiaque dans un jeu d'horreur en réalité virtuelle, influant sur la difficulté du jeu. Les résultats de cette expérimentation renforcent l'intérêt de l'utilisation de capteurs connectés comme moyen de captation physiologique dans des expériences de réalité virtuelle immersive. Ils mettent également en avant l'impact positif de ce *biofeedback* sur l'expérience utilisateur par son influence sur l'engagement. La deuxième expérience porte sur l'utilisation de l'activité cardiaque comme une mécanique d'interaction obligatoire. Elle est composée de deux parties, la première permettant de quantifier le niveau de compétence des participants dans le contrôle de leur activité cardiaque et la seconde les plongeant dans une suite de tâches en réalité virtuelle où le contrôle cardiaque est nécessaire pour les réussir. L'analyse des résultats d'expérience montre la possibilité d'utiliser cette mécanique d'interaction pour des expériences virtuelles immersives et explicite un impact positif sur le sentiment d'agentivité. Sur un plan théorique, cette thèse propose une synthèse des modèles de l'expérience utilisateur en environnement virtuel et soumet les bases d'un modèle de « l'immersion physiologique ».

Mots clés : Réalité virtuelle ; *Biofeedback* ; Internet des objets ; Engagement ; Agentivité.

IMPACT ON USER EXPERIENCE IN IMMERSIVE VIRTUAL ENVIRONMENT OF BIOFEEDBACK ISSUED FROM SMART WEARABLES

ABSTRACT:

If we identify nowadays many virtual reality studies reporting the usage of physiological data, they mainly use medical equipment, which poses strong usability constraints, is often cumbersome and limits mobility. In an attempt to overcome these limitations, this study therefore focuses on the original usage of smart wearables as substitutes for traditional sensors in immersive applications. Thus, this thesis proposes both a fundamental user experience (UX) study and a technological feasibility study. In this context, the objective of our study is to contribute to knowledge about the impact of the use of physiological data in immersive virtual environments. More precisely, the impact of biofeedback, via off-the-shelf smart wearables, on user engagement and the sense of agency. We have thus carried out two experiments allowing us to study the impacts of the different biofeedback modalities on user experience. Our first experiment implements a biofeedback based on heart rate in a virtual reality horror game, influencing the game difficulty. The results of this experiment reinforce the interest of using smart wearables to capture physiological data for immersive virtual reality experiences. They also highlight the positive impact of this biofeedback on user engagement. The second experiment focuses on the use of cardiac activity as a mandatory interaction mechanism. This experiment is composed of two parts, the first one quantifying the participants' level of competency in heart rate control and the second one immersing them in a series of tasks in virtual reality; heart rate control is necessary to complete the different steps of the experience. The results of this experiment demonstrate the possibility of using the said interaction mechanic for virtual reality experiences and indicate a positive impact on the sense of agency. On a theoretical level, this thesis proposes a synthesis of user experience models in virtual environment and submit the foundations of a model of "physiological immersion".

Keywords: Virtual reality; Biofeedback; Internet of things; Engagement; Agency.