



Impact du point de vue et de la fidélité des avatars sur les sentiments de présence et d'incarnation en environnement virtuel immersif.

Geoffrey Gorisse

► To cite this version:

Geoffrey Gorisse. Impact du point de vue et de la fidélité des avatars sur les sentiments de présence et d'incarnation en environnement virtuel immersif.. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2019. Français. NNT : 2019ENAM0004 . tel-02145747

HAL Id: tel-02145747

<https://pastel.hal.science/tel-02145747>

Submitted on 3 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

T H È S E

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

Geoffrey GORISSE

Le 24 janvier 2019

**Impact du point de vue et de la fidélité des avatars sur les sentiments
de présence et d'incarnation en environnement virtuel immersif**

Directeur de thèse : **Simon RICHIR**

Co-encadrement de la thèse : **Étienne Armand AMATO, Olivier CHRISTMANN**

Jury

M. Anatole LECUYER, Directeur de recherche, INRIA
M. Ronan BOULIC, Maître d'enseignement et de recherche, EPFL
M. Étienne Armand AMATO, Maître de conférences, UPEM
M. Alain BERTHOZ, Professeur des universités honoraire, Collège de France
M. Olivier CHRISTMANN, Maître de conférences, Arts et Métiers ParisTech
Mme Laure LEROY, Maître de conférences, Université Paris 8
M. Jean-Marie NORMAND, Maître de conférences, Centrale Nantes
M. Simon RICHIR, Professeur des universités, Arts et Métiers ParisTech
M. Étienne PERENY, Maître de conférences honoraire, Université Paris 8

Président/Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examinatrice
Examineur
Examineur
Invité

À Jean, mon grand-père

Résumé

Les travaux entrepris dans le cadre de cette thèse de doctorat portent sur l'impact de différentes modalités perceptives et graphiques pouvant affecter l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif. Le positionnement de nos recherches s'inscrit dans un contexte où une majorité d'applications de réalité virtuelle reposent sur une reconduction de la vision à la première personne induisant un transfert naturel de nos mécanismes perceptifs. Cependant, il est fréquent que ces applications recourent à une représentation partielle, voire omettent l'intégration d'entités visuelles figurant la présence de l'utilisateur et limitant dès lors l'induction d'un sentiment d'incarnation au sein de l'environnement virtuel.

Dans ce contexte, notre étude contribue à étendre les connaissances concernant l'influence du point de vue et de la fidélité visuelle des avatars sur l'expérience utilisateur. Sur un plan théorique, nos travaux proposent une articulation des notions de présence et d'incarnation au travers d'un méta-modèle reposant sur des intrications identifiées entre ces concepts lors de notre revue de littérature. Sur un plan expérimental, les trois études menées dans le cadre de nos recherches permettent d'identifier plusieurs facteurs impactant les sentiments de présence et d'incarnation, le comportement des utilisateurs, ainsi que les performances en ce qui concerne la navigation et les interactions. Notre première expérimentation démontre la possibilité d'avoir recours au point de vue à la troisième personne en réalité virtuelle tout en conservant un sentiment d'incarnation élevé. Nos résultats permettent également d'identifier les potentialités octroyées par les points de vue à la première et à la troisième personne en matière de perception, de navigation et d'interaction. Nous avons conduit par la suite une seconde étude portant sur la fidélité visuelle qui démontre l'impact positif de la similarité entre l'apparence des utilisateurs et celle de leur avatar sur l'évaluation de l'attractivité des modèles et sur le processus de sélection de personnages. Enfin, les résultats de notre troisième expérimentation démontrent l'impact positif de la véracité des avatars sur le sentiment d'incarnation, ainsi que son effet sur l'expérience subjective et le comportement des utilisateurs en environnement virtuel immersif.

Mots clés : Réalité virtuelle ; Avatar ; Présence ; Incarnation ; Point de vue ; Fidélité visuelle.

Abstract

The work undertaken in this doctoral thesis focuses on the impact of different perceptual and graphical modalities that can affect user experience in immersive virtual environment. Our research takes position in a context where a majority of virtual reality applications are based on a first-person perspective leading to a natural transfer of our perceptual mechanisms. However, these applications often use partial representation or even omit the integration of visual entities representing the presence of the user and thus limiting the induction of a sense of embodiment within the virtual environment.

In this context, our study contributes to expanding the knowledge concerning the influence of perspective and avatar visual fidelity on user experience. On a theoretical level, our work proposes an articulation of the notions of presence and embodiment through a meta-model based on intrications identified between these concepts during our literature review. On an experimental level, the three studies conducted as part of our research make it possible to identify several factors impacting the sense of presence and embodiment, user behavior and performance in terms of navigation and interaction. Our first experiment demonstrates the possibility of using a third-person perspective in virtual reality while maintaining a high sense of embodiment. Our results also make it possible to identify the potentialities enabled by first- and third-person in terms of perception, navigation and interaction. Afterward, we conducted a second study on visual fidelity that demonstrates the positive impact of the similarity between users' appearance and that of their avatar on the evaluation of models' attractiveness and on the character selection process. Finally, the results of our third experiment demonstrate the positive impact of avatars' truthfulness on the sense of embodiment, as well as its effect on the subjective experience and behavior of users in immersive virtual environment.

Keywords : Virtual Reality ; Avatar ; Presence ; Embodiment ; Perspective ; Visual Fidelity.

Remerciements

Je tiens à adresser mes remerciements au Pr Simon Richir pour la confiance qu'il m'a accordée, depuis mon recrutement en première année de master, jusqu'à la fin de ce doctorat. Lui, ainsi que l'ensemble des membres de l'institut Arts et Métiers de Laval, m'ont donné la possibilité et les moyens de mener l'ensemble de mes recherches dans des conditions des plus favorables. Je remercie le Dr Étienne Armand Amato et Étienne Perény pour leur co-encadrement et les discussions stimulantes qui ont animé ces trois années de recherche. Je remercie également le Pr Alain Berthoz de m'avoir accueilli au Collège de France où j'ai pu bénéficier de la richesse de ses enseignements dans le cadre d'un projet, genèse de ces travaux de doctorat. Je souhaite remercier toutes les institutions du Laval Virtual Center, notamment l'équipe Laval Virtual avec qui j'ai eu plaisir de collaborer à l'organisation de trois éditions de leur événement. Cette opportunité m'a permis de prendre un recul occasionnel et nécessaire pour mener à bien ce travail de thèse, contribuant ainsi à son achèvement.

Sur un plan personnel, je tiens à remercier mes parents, mon frère ainsi que mes grands-parents, dont la bienveillance à mon égard n'a eu d'égal que le soutien indéfectible dont ils ont fait preuve tout au long de mon parcours académique. Je remercie également le Dr Pascal Normand, mon oncle, pour le temps consacré à la relecture de mes travaux et ses précieux conseils. Je remercie sincèrement Charlotte et Hélène, qui ont, chacune à leur manière, contribué à l'aboutissement de cette thèse. J'adresse une pensée particulière au Dr Olivier Christmann et à Samory Houzangbe, mes amis et collègues de travail, avec qui j'ai eu l'honneur de partager ces trois années de recherche. Ces travaux n'auraient jamais pu être menés à bien sans leur collaboration ainsi que leurs enseignements scientifiques et humains, qu'ils en soient remerciés. Enfin, j'exprime toute ma gratitude à Célia avec qui j'ai partagé plus de huit années de ma vie et sans qui rien de tout cela n'aurait été possible, ni même envisageable.

Merci infiniment à toutes et à tous,

Geoffrey

Publications

Journaux internationaux à comité de lecture

Gorisse, G., Christmann, O., Houzangbe, S. et Richir, S. (in press). From Robot to Virtual Doppelganger : Impact of Visual Fidelity of Avatars Controlled in Third-Person Perspective on Embodiment and Behavior in Immersive Virtual Environments, *Frontiers in Robotics and AI*.

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.

Actes de conférences internationales

Gorisse, G., Christmann, O., Houzangbe, S. et Richir, S. (2018a). 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*, pages 48 :1-48 :5, New York, NY, USA. ACM.

Houzangbe, S., Christmann, O., Gorisse, G. et 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*, pages 12 :1-12 : 6, New York, NY, USA. ACM.

Houzangbe, S., Christmann, O., Gorisse, G. et 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*, pages 16 :1-16 : 6, New York, NY, USA. ACM.

Perény, E., Amato, E. A., Gorisse, G. et Berthoz, A. (2016). The Autoscopic Flying Avatar : A New Paradigm to Study Bilocated Presence in Mixed Reality. *In Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference*, pages 31 :1-31 :3, New York, NY, USA. ACM.

Journal national à comité de lecture

Gorisse, G., Christmann, O. et Richir, S. (2018b). 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.

Autres publications

Gorisse, G. (2015). *Rapport d’étape du projet « Devenez Avatar »*.

Table des matières

Table des matières	xv
Liste des figures	xxi
Liste des tableaux	xxvii
1 Introduction	1
1.1 Motivations personnelles	2
1.2 Origine du projet doctoral	4
1.3 Problématique et périmètre des recherches	7
1.4 Structure du mémoire de thèse	9
2 État de l’art	13
2.1 Structure de la revue de littérature	14
2.2 Avatar	15
2.2.1 Concepts et généralités	15
2.2.2 Dichotomie avatars et agents	15
2.2.3 Identification, sélection et personnalisation	16
2.2.4 Avatars et environnements virtuels immersifs	18
2.3 Expérience utilisateur	20
2.3.1 Utilisabilité et expérience utilisateur	20
2.3.2 Modèles d’expérience utilisateur dédiés aux environnements virtuels immersifs	22
2.3.3 Présence	25
2.3.4 Incarnation	37
2.4 Point de vue en environnement virtuel	43
2.4.1 La notion de point de vue	43
2.4.2 Périmètre des investigations : première et troisième personne en envi- ronnement immersif	46

2.4.3	Perception, spatialisation et interaction	48
2.4.4	Point de vue et sentiment d'incarnation	51
2.5	Apparence et fidélité des avatars	54
2.5.1	Fidélité visuelle et comportementale	54
2.5.2	Cohérence visuelle et comportementale : la « vallée dérangement » . .	60
2.5.3	Avatars et implications comportementales	64
2.6	Synthèse de l'état de l'art	68
3	Méthodologie	73
3.1	Introduction	74
3.2	Proposition d'un Méta-modèle Présence - Incarnation	75
3.3	Évaluation de l'expérience utilisateur	78
3.3.1	Méthodes subjectives : questionnaires et entretiens	78
3.3.2	Élaboration d'un questionnaire	84
3.3.3	Méthodes objectives : analyses physiologiques et comportementales . .	87
3.3.4	Confrontation des analyses subjectives et objectives	89
4	Expérimentation 1 : point de vue en environnement virtuel immersif	91
4.1	Résumé	92
4.2	Présentation de l'expérimentation	93
4.3	Matériel et méthodes	95
4.3.1	Application	95
4.3.2	Équipement	96
4.3.3	Participants	96
4.3.4	Procédure	97
4.3.5	Mesures	100
4.3.6	Hypothèses	101
4.4	Résultats	102
4.4.1	Présence physique	102
4.4.2	Incarnation	103
4.4.3	Performances	103
4.5	Discussion	109
4.5.1	Impact du point de vue sur la présence et l'incarnation	109
4.5.2	Impact du point de vue sur les performances	110
4.5.3	Limites de l'étude	112

5	Expérimentation 2.1 : impact de la fidélité des avatars sur l'attractivité perçue	115
5.1	Résumé	116
5.2	Présentation de l'étude	117
5.3	Matériel et méthodes	118
5.3.1	Application	118
5.3.2	Équipement	119
5.3.3	Participants	119
5.3.4	Procédure	119
5.3.5	Mesures	120
5.3.6	Hypothèses	120
5.4	Résultats	121
5.4.1	Attractivité des avatars	121
5.4.2	Estime de soi et sélection de personnages	122
5.5	Discussion	124
5.5.1	Introduction de la seconde phase expérimentale	125
6	Expérimentation 2.2 : impact de la fidélité des avatars sur l'incarnation et le comportement	127
6.1	Résumé	128
6.2	Présentation de l'étude	129
6.3	Matériel et méthodes	131
6.3.1	Application	131
6.3.2	Équipement	133
6.3.3	Participants	133
6.3.4	Procédure	134
6.3.5	Mesures	137
6.3.6	Hypothèses	137
6.4	Résultats	138
6.4.1	Incarnation	138
6.4.2	Implications comportementales	139
6.5	Discussion	142
6.5.1	Impact de la fidélité visuelle sur le sentiment d'incarnation	142
6.5.2	Implications comportementales liées à la fidélité visuelle des avatars	143
6.5.3	Limites de l'étude	145

7	Bilan, contributions et perspectives des travaux de recherche	147
7.1	Réponse à la problématique de recherche	148
7.1.1	Contextualisation des travaux	148
7.1.2	Réponses aux questions de recherche	149
7.2	Synthèse des apports théoriques et expérimentaux	153
7.3	Perspectives et travaux futurs	154
	Bibliographie	157
A	Annexes à l'expérimentation 1	177
A.1	Figures complémentaires	178
A.2	Guide d'entretien post-passation	182
B	Annexes à l'expérimentation 2.1	185
B.1	Figures complémentaires	186
B.2	Échelle de Rosenberg (EN/FR)	187
C	Annexes à l'expérimentation 2.2	189
C.1	Figures complémentaires	190
C.2	Guide d'entretien post-passation	196

Liste des figures

1.1	Illustration de l'installation « Devenez Avatar » au sein du service de neuro-physiologie du Collège de France.	5
2.1	CAVE à 4 faces © CLARTE 2007.	19
2.2	Modèle Immersion, Presence, Performance (IPP) [Bystrom <i>et al.</i> , 1999] [Traduction].	28
2.3	Représentation schématique des phénomènes autoscopiques : hallucination autoscopique (gauche), hallucination heautoscopique (centre) et expérience de sortie du corps (droite). La position et la posture du corps physique pour chaque phénomène autoscopique sont indiquées par des lignes noires continues et la position du corps désincarné en lignes pointillées [Blanke et Mohr, 2005].	39
2.4	Illustration du paradigme de la main de caoutchouc (<i>Rubber Hand Illusion</i>). Un sujet en bonne santé fait l'expérience d'un membre artificiel comme faisant partie de son propre corps. Le sujet observe une main humaine factice tandis que sa propre main est cachée (carré gris). Une stimulation visuotactile synchrone est appliquée simultanément sur la main artificielle et sur la main réelle invisible. L'illustration de droite montre l'illusion du sujet alors que les stimulations tactiles sont congruentes avec les coups perçus de la sonde (les zones sombres montrent des zones d'activité accrue dans le cortex prémoteur ; la position illusoire phénuménalement ressentie du bras est indiquée par le contour bordant la main factice). [Metzinger, 2009]	41

2.5	Illustration de six points de vue employés pour le développement de contenu vidéoludique. Points de vue à la première (2.5a) et à la troisième personne (2.5b) du jeu <i>PlayerUnknown's Battlegrounds</i> (PUBG Corporation, 2017). Vue de trois quarts du <i>hack'n slash Diablo 3</i> (Blizzard Entertainment, 2012) (2.5c). Vue divine du jeu de stratégie et de gestion <i>StarCraft 2</i> (Blizzard Entertainment, 2010) (2.5d). Caméra fixe intégrée au mode caméra classique du jeu d'horreur <i>Resident Evil 4</i> (Capcom, 2005) (2.5e). Caméra 2D à défilement latéral du jeu de plateformes <i>Seasons After Fall</i> (Focus Home Interactive, 2016) (2.5f).	45
2.6	Démonstration technique de la librairie FaceWorks © NVIDIA Corporation 2018.	54
2.7	Illustration de deux niveaux de réalisme induits par la variation des <i>shaders</i> et des textures du personnage Adam issu du court métrage temps réel éponyme développé par Unity Technologies. Le modèle de la figure 2.7b comporte l'ensemble des textures originales du personnage ainsi qu'un <i>shader</i> au rendu physique réaliste (<i>PBR</i>). Le modèle de la figure 2.7a n'utilise que la texture comportant les informations colorimétriques et un <i>shader</i> de rendu stylisé (<i>toon-shading</i>) © Unity Technologies ApS 2016.	57
2.8	Courbe de la théorie de la vallée dérangement [Mori, 1970; Mori <i>et al.</i> , 2012] illustrant la variation du potentiel d'acceptation d'une entité en fonction de sa ressemblance avec l'être humain. Une amplification du phénomène est observable pour les entités animées.	61
2.9	Captures d'écran de personnages issus des jeux vidéo Mass Effect : Andromeda © 2017 Electronic Arts Inc (Figure 2.9a) et Hellblade © 2017 Ninja Theory Ltd (Figure 2.9b). Ce comparatif illustre le phénomène de la vallée dérangement (<i>Uncanny Valley</i>) [Mori, 1970; Mori <i>et al.</i> , 2012]. Les personnages de ces deux jeux sortis en 2017 présentent des niveaux d'expressivité drastiquement différents. Si Mass Effect : Andromeda a essuyé de nombreuses critiques négatives engendrant le développement d'un correctif, Hellblade à quant à lui été plébiscité pour ses animations mettant en œuvres des techniques de capture des mouvements faciaux.	63
2.10	Portraits de Sigmund Freud (2.10a) et d'Albert Einstein (2.10a).	66
3.1	Méta-modèle Présence - Incarnation [Gorisse <i>et al.</i> , 2018b].	75
4.1	Illustration du contenu de l'application de réalité virtuelle développée pour l'expérimentation 1 : point de vue en environnement virtuel immersif.	92

4.2	Personnage virtuel contrôlé en temps réel par les utilisateurs perçu depuis un point de vue à la première (4.2a) et à la troisième personne (4.2b).	93
4.3	Représentation schématique du contrôle du point de vue à la troisième personne.	96
4.4	Utilisateur équipé du matériel requis pour l'expérimentation : casque de réalité virtuelle HTC Vive et combinaison de capture de mouvement Perception Neuron.	97
4.5	Illustration des trois phases de l'expérimentation 1.	99
4.6	Moyennes des facteurs LE et AP de la dimension présence physique.	102
4.7	Moyennes des facteurs LS, A et P de la dimension incarnation.	103
4.8	Scores des items du facteur point de vue : perception (Q1), interactions (Q2), navigation (Q3), interactions précises (Q4).	104
4.9	Temps de perception moyen des projectiles.	104
4.10	Nombre moyen de sphères déviées.	105
4.11	Durée totale des phases de navigation avec et sans obstacles.	106
4.12	Durée d'interaction moyenne avec les terminaux.	106
5.1	Illustration du contenu de l'application de réalité virtuelle utilisée lors de l'expérimentation 2.1 : impact de la fidélité visuelle des avatars et de l'estime de soi sur l'attractivité perçue et la sélection de personnages.	116
5.2	Illustration des avatars intégrés dans l'application présentant trois niveaux de véracité.	118
5.3	Illustration de trois reconstructions de bustes (50 k polygones) et de leurs versions optimisées (2,5 k polygones) intégrées dans l'application de réalité virtuelle dédiée à l'expérimentation.	120
5.4	Distribution des scores d'attractivité des avatars.	122
5.5	Distribution des niveaux d'estime de soi des participants.	122
5.6	Distribution du choix des avatars pour les 34 participants.	123
5.7	Niveau d'estime de soi des participants en fonction de l'avatar sélectionné. . .	123
6.1	Illustration du contenu de l'application de réalité virtuelle utilisée lors de l'expérimentation 2.2 : impact de la fidélité visuelle des avatars sur le sentiment d'incarnation et sur le comportement en environnement virtuel immersif. . . .	128
6.2	Illustration des avatars intégrés dans l'application de l'expérimentation 2.2 présentant trois niveaux de véracité.	131
6.3	Personnage virtuel présentant un niveau de véracité intermédiaire perçu depuis un point de vue à la première (6.3a) et à la troisième personne (6.3b).	133

6.4	Utilisateur équipé avec le matériel requis pour l'expérimentation : casque de réalité virtuelle HTC Vive et adaptateur sans fil TP Cast, Vive Trackers. . .	134
6.5	Configuration de l'arène virtuelle lors des tâches de l'expérimentation 2.2. . .	136
6.6	Moyennes des facteurs LS, A et P de la dimension incarnation.	139
6.7	Moyennes du nombre de collisions avec les sphères.	140
A.1	Point de vue à la première (A.1a) et à la troisième personne (A.1b).	178
A.2	Illustration de l'avatar contrôlé par les utilisateurs lors de la phase d'accommodation.	179
A.3	Illustration des tâches de l'expérimentation 1.	180
A.4	Combinaison sans fil Perception Neuron constitué de 32 capteurs inertiels (gyroscopes 3 axes, accéléromètres 3 axes et magnétomètres 3 axes) et cadencé à 60 Hz.	181
B.1	Illustration de trois reconstructions de bustes optimisées (2.5K polygones) et intégrées dans l'application de réalité virtuelle dédiée à l'expérimentation. . .	186
C.1	Illustration du robot (C.1a) et de la combinaison (C.1b).	190
C.2	Configuration de l'arène virtuelle lors de la phase d'accommodation (C.2a) et de la tâche 1 (C.2b) de l'expérimentation 2.2.	191
C.3	Configuration de l'arène virtuelle lors des tâches 2 (C.3a) et 3 (C.3b) de l'expérimentation 2.2.	192
C.4	Configuration de l'arène virtuelle lors des tâches 4 (C.4a) et 5 (C.4b) de l'expérimentation 2.2.	193
C.5	Matériel dédié à l'expérimentation 2.2.	194
C.6	Configuration de l'espace physique (C.6a) et mise en situation d'un utilisateur (C.6b) lors de l'expérimentation 2.2.	195

Liste des tableaux

2.1	Synthèse des composantes de modèles d'expérience utilisateur dédiés aux environnements virtuels immersifs.	24
2.2	Synthèse de différentes catégorisations de la présence proposées par Biocca [1997]; Heeter [1992]; Lee [2004]; Lombard et Ditton [1997] (partie 1).	31
2.3	Synthèse de différentes catégorisations de la présence proposées par Biocca [1997]; Heeter [1992]; Lee [2004]; Lombard et Ditton [1997] (partie 2).	32
2.4	Synthèse des résultats de l'expérimentation de Salamin <i>et al.</i> [2006] présentant les points de vue favorables à chacune des situations évaluées (première (1P) et troisième personne (3P))	50
3.1	Synthèse de questionnaires permettant l'évaluation des différents facteurs de la notion de présence en environnement virtuel immersif. Les questionnaires sont répartis suivant les facteurs communs avec la catégorisation de la présence de Lee [2004]. Les dimensions ne pouvant figurer dans ces catégories et évaluant des notions connexes liées à l'expérience utilisateur sont listées dans une colonne dédiée.	81
3.2	Questionnaire post-expérimentation composé de deux dimensions : présence physique (Localisation Environnementale - LE , Actions Possibles - AP), Incarnation (Localisation de Soi - LS , Agentivité - A , Possession - P). La mention (r) indique les items aux scores inversés.	86
4.1	Questionnaire post-expérimentation composé de trois dimensions : présence physique (Localisation Environnementale - LE , Actions Possibles - AP), Incarnation (Localisation de Soi - LS , Agentivité - A , Possession - P), Point de vue(PDV). La mention (r) indique les items aux scores inversés.	107

4.2	Résumé statistique des réponses au questionnaire post-expérimentation présentant chaque facteur des trois dimensions : présence physique (Localisation Environnementale - LE , Actions Possibles - AP), Incarnation (Localisation de Soi - LS , Agentivité - A , Possession - P), Point de Vue (PDV). Les moyennes et les écarts types sont reportés pour chaque condition (1P/3P). Le seuil de significativité est reporté uniquement quand $p < 0,05$. La mention (r) indique les items aux scores inversés.	108
5.1	Résumé des statistiques descriptives des scores d'attractivité des avatars et de leur fréquence de sélection.	121
6.1	Questionnaire post-expérimentation composé de deux dimensions : Incarnation (Localisation de Soi - LS , Agentivité - A , Possession - P), Effet Proteus (EP). La mention (r) indique les items aux scores inversés.	141
6.2	Résumé statistique des réponses au questionnaire post-expérimentation présentant chaque facteur des deux dimensions : Incarnation (Localisation de Soi - SL , Agentivité - A , Possession - P), Effet Proteus (PE). Les moyennes et les écarts types sont reportés pour chaque condition (robot, combinaison, dop-pelgänger). Le seuil de significativité est reporté uniquement quand $p < 0,05$. La mention (r) indique les items aux scores inversés.	141
A.1	Guide d'entretien post-passation de l'expérimentation 1.	182
B.1	Version originale de l'échelle de Rosenberg [1965].	187
B.2	Traduction française de l'échelle de Rosenberg [Vallieres et Vallerand, 1990].	187
C.1	Guide d'entretien post-passation de l'expérimentation 2.2.	196

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Motivations personnelles	2
1.2	Origine du projet doctoral	4
1.3	Problématique et périmètre des recherches	7
1.4	Structure du mémoire de thèse	9

1.1 Motivations personnelles

Depuis l'apparition des premiers ordinateurs, la compréhension des interactions entre l'homme et la machine fait l'objet d'investigations pluridisciplinaires. L'essor des technologies du virtuel, proposant toujours plus de modalités d'immersion et d'interaction, suscite actuellement l'intérêt de nombreuses communautés de chercheurs issus de l'informatique, des sciences de l'information et de la communication, de la psychologie ou encore des neurosciences. Le développement et l'accessibilité des dispositifs de réalité virtuelle connaissant une expansion sans précédent, la compréhension des modalités impactant l'expérience procurée à l'utilisateur est un enjeu scientifique majeur. La principale source de motivation m'ayant conduit à entreprendre ces trois années de recherche repose ainsi sur le questionnement suivant : comment franchissons-nous la barrière entre le monde physique et le monde virtuel, quels sont les mécanismes à l'œuvre permettant la projection dans un univers simulé à tel point que ce dernier en devienne notre réalité ?

Ayant passé de nombreuses heures à parcourir des univers persistants en ligne depuis mon adolescence, j'ai toujours été fasciné par la relation entretenue entre le joueur et ses avatars¹. Je me souviens avoir passé, et passer encore aujourd'hui, de nombreuses heures à explorer les potentialités offertes par les outils de création de personnages. Cette phase a toujours été pour moi comparable à la naissance d'un nouveau « soi » présageant de longues périodes d'exploration et d'aventures mémorables. Si pour la plupart l'histoire s'arrête une fois l'ordinateur éteint, je pense qu'il n'en est rien. À l'image d'événements marquants de notre vie, je garde de précieux souvenirs de chacun des avatars m'ayant conduit à vivre des aventures que je prends aujourd'hui plaisir à raconter, comme autant de moments vécus et mémorables. Lors de l'exploration de mondes virtuels, notre avatar est à l'interface des relations avec l'espace simulé et les éléments le constituant. Ainsi, c'est au travers de ce dernier que nous nous incarnons et que nous interagissons avec l'environnement et les autres personnages (joueurs ou non-joueurs) constituant un tissu social, à l'image des relations que nous pouvons entretenir en société, avec toute la complexité que cela engendre. En effet, il s'agit là d'écosystèmes régis par des règles, mais qui offrent une grande liberté d'action donnant lieu à l'émergence de systèmes sociaux, politiques, financiers, etc. Au cœur de ces systèmes : les joueurs et leurs avatars. Je me suis toujours questionné sur les facteurs à l'origine des choix ayant influé sur la conception des personnages représentant les utilisateurs au sein de ces microcosmes. Que souhaitons-nous dévoiler de nous-mêmes au travers de ces

1. Initialement utilisé pour désigner chacune des incarnations de Vishnou dans la religion hindoue. En informatique, le terme avatar désigne le personnage virtuel que l'utilisateur d'un ordinateur choisit pour le représenter graphiquement, dans un jeu électronique ou dans un lieu virtuel de rencontre.

entités que sont nos avatars ? S'agit-il de créer un personnage à notre image ou d'exacerber certaines facettes de notre personnalité ? Est-ce au contraire un moyen d'expérimenter des alternatives à notre condition réelle, de devenir, au sein d'un espace simulé, ce que l'on ne peut pas être chaque jour ?

L'ensemble de ces réflexions et de ces questionnements m'a conduit à mener ce travail de recherche visant à investiguer l'impact de la fidélité visuelle des avatars sur l'expérience procurée aux utilisateurs d'un système de réalité virtuelle. Ce travail ambitionne notamment de déterminer l'impact de la véracité, c'est-à-dire la similarité entre l'apparence de l'utilisateur et celle de son avatar, sur le sentiment d'incarnation et ses implications comportementales en environnement immersif. La considération du facteur humain dans ce type d'investigation s'avère primordiale dans le cadre de notre approche que nous qualifions de centrée utilisateur. Si les travaux entrepris lors cette thèse de doctorat visent à identifier les modalités perceptives et graphiques permettant de favoriser la projection de soi en environnement virtuel, nos considérations s'avèrent éminemment focalisées sur l'expérience vécue par l'utilisateur. En effet, bien que l'évolution fulgurante des technologies immersives promette le développement de matériels toujours plus performants participant indéniablement à la réalisation d'expériences qualitatives, la différence se fera néanmoins par le développement de nouveaux usages prenant en considération l'impact des facteurs influant sur l'expérience subjective des utilisateurs de technologies immersives.

C'est dans ce contexte stimulant en perpétuelle évolution que nous ambitionnons d'apporter une contribution à l'étendue des connaissances actuelles. Ainsi, c'est avec passion et détermination que j'ai eu l'opportunité d'entreprendre mes recherches pendant trois années à la frontière entre informatique et psychologie expérimentale. Ce type d'investigation pluridisciplinaire m'a demandé de faire preuve d'adaptabilité, me conduisant chaque jour à repousser mes limites afin d'être en mesure de travailler à l'interface de ces disciplines et d'investiguer les facteurs humains et technologiques déterminants dans la relation entre l'homme et la machine.

1.2 Origine du projet doctoral

Les fondements du sujet de cette thèse de doctorat reposent sur les travaux réalisés lors de mon stage de master 2 Ingénierie du Virtuel et de l'Innovation (IVI) dispensé à Laval par l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM). À cette occasion, j'ai eu l'opportunité d'intégrer l'unité de recherche en neurophysiologie du Collège de France dirigée par le Professeur Alain Berthoz. J'ai été amené à travailler en tant qu'ingénieur de recherche sur un projet intitulé « Devenez Avatar » imaginé conjointement par Étienne Perény², Étienne Armand Amato³ et Alain Berthoz⁴. Ainsi, ce projet pluridisciplinaire mêle sciences de l'information et de la communication (SIC), neurophysiologie et réalité virtuelle [Gorisse, 2015].

Les objectifs de ce projet de recherche fondamentale concernent l'analyse des rapports existant entre utilisateurs et « avatars jouables des mondes numériques » [Amato et Perény, 2013], avec pour ambition d'objectiver le sentiment de présence en environnement virtuel, ou encore, l'étude instrumentée de ce qui est appelé par les auteurs du projet « l'immersion avatariale » [Perény, 2015]. En cela, la collaboration des différentes institutions en présence prend son sens, car si les SIC sont coutumières des analyses médiatiques et subjectives, c'est par une approche physiologique avec le potentiel de mesure et d'analyse offert par cette discipline que ce projet tente d'objectiver l'expérience vécue par les sujets. Un des objectifs du projet fut d'étudier les propos relatés par de nombreux joueurs chevronnés des mondes virtuels et de mettre en évidence certains mécanismes à l'œuvre dans la relation entre l'utilisateur et son avatar [Amato, 2008]. Dans ce contexte, de multiples témoignages de joueurs et autres « explorateurs des mondes numériques » furent initialement recueillis à l'occasion de travaux préparatoires au lancement du projet « Devenez Avatar ». Il apparaît que la fréquentation soutenue d'un point de vue temporel des jeux vidéo, ou d'autres environnements virtuels, conduit les utilisateurs à une appropriation et à une identification profonde à leur avatar. De cette appropriation résulte l'utilisation de la première personne (« je ») pour désigner l'entité incarnée dans l'univers virtuel. Ainsi, le dispositif mis en œuvre dans le cadre du projet ambitionne de prendre au mot ces personnes en leur proposant de projeter leur propre image capturée en vidéo dans un environnement virtuel lors d'une activité de vol virtuel à caractère onirique.

2. Maître de conférences honoraire à l'Université Paris 8, Étienne Perény étudie de façon théorique et expérimentale les propriétés des images électro-numériques interactives.

3. Maître de conférences au sein du laboratoire DICEN-IDF (CNAM) et de l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Étienne Armand Amato analyse les médias interactifs, les jeux vidéo et les cultures numériques.

4. Professeur émérite au Collège de France, Alain Berthoz dirige des recherches fondamentales et appliquées en neurophysiologie de la perception et de l'action.

Le dispositif « Devenez Avatar » exploite des technologies d'effets spéciaux issues du domaine de l'audiovisuel permettant de projeter l'image de l'utilisateur au sein de l'environnement virtuel par incrustation vidéo temps réel (*chroma key*, Figure 1.1). L'idée initiale était alors d'induire une réduction drastique de la durée de la phase d'appropriation de l'avatar par le participant via un processus d'auto-identification.



FIGURE 1.1 – Illustration de l'installation « Devenez Avatar » au sein du service de neurophysiologie du Collège de France.

L'originalité du projet « Devenez Avatar » réside dans la confrontation du participant à sa propre image, tel qu'on pourrait l'observer dans les expériences de sortie du corps artificielles. Il s'agit là d'une situation réflexive inhabituelle, car non frontale, à l'inverse de celle à laquelle nous sommes généralement confrontés en nous observant face à un miroir. Ce dispositif propose donc une vision à la troisième personne projetant le participant au sein d'un environnement virtuel. Pourtant, bien qu'originale par la confrontation à notre propre image, le point de vue à la troisième personne reste néanmoins un classique des jeux vidéo. À l'heure actuelle, beaucoup de propositions vidéoludiques intègrent un avatar de synthèse vu de dos, suivi à une distance variable par une caméra virtuelle permettant de le percevoir en action au sein de l'espace simulé. Le point notable du dispositif repose donc sur la combinaison de ces particularités, à savoir : la projection de l'image du corps propre au sein de l'univers virtuel et le recours à une vision à la troisième personne. Le type de technologie utilisé permet l'alternance de différentes configurations entre représentation de soi par incrustation vidéo ou par le biais d'un avatar 3D contrôlé grâce à un système de capture de mouvement. Dès lors, il fut envisagé de pouvoir réaliser des analyses comparatives entre ces situations afin d'éclairer le lien existant entre les utilisateurs et leurs avatars.

La mise en place de ce dispositif expérimental au Collège de France a permis, et permet encore aujourd'hui, la réalisation de tests pilotes pour des études cliniques. Un financement a également été obtenu auprès du Centre National d'Études Spatiales (CNES), permettant de poursuivre les recherches sur ce paradigme via le développement et la déclinaison de l'application initiale.

Sur les bases théoriques et pratiques développées dans le cadre du projet « Devenez Avatar », et à l'issue des recherches réalisés dans le cadre du master IVI, nous avons été en mesure de formuler les problématiques à l'origine des travaux de doctorat que nous nous apprêtons à restituer ici.

1.3 Problématique et périmètre des recherches

Les travaux entrepris dans le cadre de cette thèse de doctorat portent sur l'étude de l'impact de différentes modalités perceptives et graphiques pouvant affecter l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif. Nos investigations concernent notamment l'influence du point de vue et l'impact de la fidélité visuelle des avatars sur les sentiments de présence et d'incarnation, ainsi que sur le comportement des utilisateurs ; autant de notions que nous nous attacherons à définir lors de la restitution de notre revue de littérature.

À l'heure actuelle, une majorité d'applications de réalité virtuelle repose sur une reconduction de la vision à la première personne, c'est-à-dire en vue subjective, induisant un transfert naturel de nos mécanismes perceptifs. La thématique de recherche développée ici envisage les apports possibles d'une vision à la troisième personne en environnement immersif, impliquant le contrôle d'un avatar visualisé comme protagoniste de l'action. Il s'agit d'étudier les effets produits par une perception visuelle de soi-même *in situ* afin d'en analyser les conséquences sur les sentiments de présence et d'incarnation. Des solutions techniques seront mises en œuvre pour modéliser des avatars présentant divers niveaux de fidélité visuelle, allant de personnages robotiques humanoïdes à la reconstruction 3D des utilisateurs se trouvant ainsi directement intégrés au sein de l'environnement virtuel.

La majorité des dispositifs immersifs permettent de projeter l'environnement de synthèse autour de l'utilisateur via différents dispositifs matériels (casque, CAVE, etc.). Ces technologies ont pour objectif de produire l'illusion d'une présence au sein d'un environnement virtuel. Pour ce faire, on constate la plupart du temps une mise en situation de l'utilisateur dans la scène virtuelle via la reconduction de son point de vue à la première personne, aussi qualifié d'égo-centré. La première problématique de notre recherche concerne donc l'analyse des potentialités offertes par une projection inverse. Il sera ainsi étudié différentes solutions permettant de restituer un point de vue à la troisième personne, ou hétérocentré, induisant une nouvelle perception des environnements virtuels immersifs. C'est donc dans ce retournement de situation que réside un des points fondamentaux de nos travaux et que découle notre première question de recherche :

***Q1 :** Quel est l'impact du point de vue sur les sentiments de présence et d'incarnation, ainsi que sur les performances des utilisateurs en matière de navigation et d'interactions en environnement virtuel immersif ?*

Dans un second temps, grâce à la mise en œuvre de technologies émergentes, nous souhaitons analyser l'impact du recours à une représentation fidèle de l'utilisateur via des procédés de reconstruction permettant la modélisation en trois dimensions, l'intégration et l'exploitation en temps réel du modèle d'un individu. Nous souhaitons ici investiguer l'impact de la similarité entre l'utilisateur et son avatar sur le sentiment d'incarnation et sur les implications comportementales, notamment afin d'identifier les bénéfices potentiels du recours à ce type de technologie pour la production d'environnements virtuels. Ainsi, les études menées dans le cadre de la seconde partie de ce projet doctoral s'articulent autour de la question de recherche suivante :

***Q2 :** Quel est l'impact de la fidélité visuelle des avatars, notamment de la similarité entre l'utilisateur et l'avatar, sur le sentiment d'incarnation et sur le comportement des utilisateurs en environnement virtuel immersif ?*

Préalablement à la restitution des travaux entrepris pour répondre à ces questions, il semble nécessaire de circonscrire le périmètre de notre étude afin d'en expliciter l'axe et la portée. Tout d'abord, nos recherches se focalisent sur la relation entre l'utilisateur et son avatar. Ainsi, les notions de présence sociale et de co-présence ne seront abordées que dans le cadre de notre revue de littérature, lors de la présentation des différentes typologies de la notion de présence. Par ailleurs, la notion d'avatar en informatique est applicable à de nombreuses entités représentant l'utilisateur au sein d'un environnement virtuel. Cette représentation peut prendre différentes formes, allant d'une simple image à un avatar 3D complexe. Nos recherches se focalisent cependant uniquement sur l'étude d'avatars présentant un schéma corporel anthropomorphique. Nos investigations portant sur des environnements immersifs et interactifs, nous avons recours à des dispositifs de capture de mouvement afin de contrôler en temps réel le corps des personnages virtuels. Dans ce contexte, la similarité du schéma corporel de l'utilisateur et de l'avatar permet un transfert naturel et synchrone des mécanismes de navigation et d'interaction.

L'ensemble des panels recrutés pour nos expérimentations est constitué de participants ayant une expérience de la réalité virtuelle. Ce choix délibéré, bien que pouvant sembler limitant pour la portée et la généralisation de nos résultats, nous semble raisonnable dans la mesure où nous considérons qu'à l'avenir, la majorité de la population aura accès à ce type de technologie grâce à la démocratisation actuelle de la réalité virtuelle. Par ailleurs, cela permet de limiter la durée du processus d'accommodation et favorise la concentration des participants sur le contenu de l'expérience et non sur la nouveauté du dispositif.

1.4 Structure du mémoire de thèse

Le **chapitre 2** restitue l'ensemble de nos recherches bibliographiques et synthétise les travaux antérieurs portant sur les notions investiguées durant ces trois années de thèse. Ce chapitre introduit tout d'abord le concept d'avatar, élément central et fil conducteur de nos recherches. Ce préambule permet notamment d'expliciter les bases de nos travaux et d'articuler la suite de notre revue de littérature. La seconde partie de ce chapitre présente la notion d'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif et s'attache à définir et à restituer les travaux portant sur les facteurs principaux évalués dans le cadre de nos recherches, tels que les sentiments de présence et d'incarnation. Est ensuite abordée la notion de point de vue et son impact sur les composantes de l'expérience utilisateur préalablement présentées. Enfin, ce second chapitre se conclut par la restitution des travaux portant sur l'impact de l'apparence et de la fidélité visuelle des avatars.

A l'issue de notre revue de littérature, le **chapitre 3** présente les différentes approches méthodologiques mises en œuvre dans nos recherches. Ainsi, la première partie de ce chapitre présente la proposition d'un méta-modèle théorique articulant les notions de présence et d'incarnation. Sont ensuite restituées les différentes méthodes d'évaluation de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif, notamment des approches subjectives et objectives issues de travaux antérieurs permettant l'analyse des sentiments de présence et d'incarnation. Suite à la présentation des questionnaires existants et sur la base de notre modèle théorique, nous aboutirons à la construction d'un questionnaire utilisé lors de nos expérimentations.

Les **chapitres 4, 5 et 6** restituent l'ensemble des études menées dans le cadre de cette thèse. La structure de ces chapitres suit une trame similaire. On retrouve ainsi une partie introductive présentant les objectifs de chacune des expérimentations, la présentation des méthodes et des matériels mis en œuvre, la restitution des résultats et leur discussion.

Le **chapitre 4** présente l'expérimentation entreprise dans le cadre de la première année de recherche. Cette étude empirique vise à déterminer l'impact du point de vue (première et troisième personne) en environnement virtuel immersif sur la présence physique, le sentiment d'incarnation et les performances (navigation, interaction, etc.). L'objectif de cette expérimentation est d'étudier la possible utilisation du point de vue à la troisième personne, classiquement utilisé dans le milieu du jeu vidéo, dans un système de réalité virtuelle immersif. Les apports de cette étude serviront de support aux expérimentations subséquentes. Le **chapitre 5** présente notre première étude portant sur l'impact de la fidélité visuelle des avatars. Dans cette étude introductive, nous nous attachons à évaluer l'impact de la véra-

cité des avatars sur leur niveau d'attractivité perçu par les participants. Par ailleurs, cette expérimentation intégrant la reconstruction 3D des utilisateurs, l'effet de l'estime de soi des participants sur le processus de sélection de personnages est également considéré. Basé sur l'étude introductive préalable, le **chapitre 6** conclut la présentation de nos expérimentations en restituant la seconde phase de nos investigations portant sur l'impact de la fidélité visuelle des avatars sur le sentiment d'incarnation et les implications comportementales.

La conclusion de ce document, présentée dans le **chapitre 7**, synthétise les contributions issues de l'ensemble des études entreprises dans le cadre de cette thèse de doctorat et apportera une réponse à notre problématique de recherche. Nous évoquerons dès lors les limites de nos études ainsi que les pistes potentielles présageant nos travaux futurs.

Chapitre 2

État de l'art

Sommaire

2.1	Structure de la revue de littérature	14
2.2	Avatar	15
2.2.1	Concepts et généralités	15
2.2.2	Dichotomie avatars et agents	15
2.2.3	Identification, sélection et personnalisation	16
2.2.4	Avatars et environnements virtuels immersifs	18
2.3	Expérience utilisateur	20
2.3.1	Utilisabilité et expérience utilisateur	20
2.3.2	Modèles d'expérience utilisateur dédiés aux environnements virtuels immersifs	22
2.3.3	Présence	25
2.3.4	Incarnation	37
2.4	Point de vue en environnement virtuel	43
2.4.1	La notion de point de vue	43
2.4.2	Périmètre des investigations : première et troisième personne en en- vironnement immersif	46
2.4.3	Perception, spatialisation et interaction	48
2.4.4	Point de vue et sentiment d'incarnation	51
2.5	Apparence et fidélité des avatars	54
2.5.1	Fidélité visuelle et comportementale	54
2.5.2	Cohérence visuelle et comportementale : la « vallée dérangement » .	60
2.5.3	Avatars et implications comportementales	64
2.6	Synthèse de l'état de l'art	68

2.1 Structure de la revue de littérature

Ce chapitre restitue l'ensemble de notre revue de littérature et présente l'avancée des recherches portant sur les notions et concepts abordés dans le cadre de nos travaux. Ce chapitre s'articule suivant quatre axes majeurs permettant d'explicitier le cadre théorique de nos études. Il sera tout d'abord introduit la notion d'**avatar**, notamment à travers une présentation générale de ce concept fondamental dans le cadre de notre étude. Nous évoquerons en outre la dichotomie entre avatars et agents afin de circonscrire le périmètre de nos recherches, puis nous aborderons la notion d'avatar au travers du prisme de la réalité virtuelle. La seconde partie de notre revue de littérature introduira la notion d'**expérience utilisateur** préalablement à la définition de notions centrales telles que la présence et l'incarnation que nous aborderons et évaluerons à travers l'ensemble de nos études empiriques. Les deux dernières parties de notre revue de littérature sont essentiellement centrées autour des concepts évalués lors de nos campagnes d'expérimentation. La troisième partie de ce chapitre présente la notion de **point de vue** et son impact sur l'expérience utilisateur, ainsi que sur les performances en environnements virtuels immersifs. Enfin, la quatrième partie de nos recherches bibliographiques présente la notion de **fidélité visuelle** des avatars et sa catégorisation en trois critères distincts : l'anthropomorphisme, le réalisme et la véracité. Nous porterons une attention particulière à ce dernier critère correspondant à la similarité entre l'apparence de l'utilisateur et celle de son avatar, point central de nos investigations. Nous évoquerons également l'impact des caractéristiques visuelles des avatars sur le comportement des utilisateurs.

Nous concluons la restitution de nos recherches bibliographiques par une synthèse de notre revue de littérature qui nous permettra d'introduire nos propositions théoriques basées sur les recherches restituées ci-après.

2.2 Avatar

2.2.1 Concepts et généralités

La notion d'avatar s'avère être le fil conducteur de nos investigations, c'est pourquoi la première partie de notre revue de littérature se propose de présenter et de définir ce concept. Bien que l'utilisation d'avatar ne se limite pas aux environnements virtuels, nous porterons une attention particulière aux recherches issues du jeu vidéo et de la réalité virtuelle. L'introduction de ce concept ambitionne de donner une définition généraliste de la notion d'avatar afin de permettre la compréhension de l'ensemble de nos recherches bibliographique. Nous reviendrons ultérieurement sur cette notion au regard des problématiques de notre sujet, notamment lorsque nous aborderons la section dédiée à la fidélité visuelle et son impact sur l'expérience utilisateur en environnement virtuel.

Le terme avatar puise ses racines dans le sanskrit, langue indo-européenne appartenant à la sous famille indo-aryenne. Cette langue liturgique compose notamment les textes religieux hindous et bouddhistes. Ainsi, le terme avatar signifie « descente, incarnation divine ». Dans la religion hindouiste, l'avatar représente l'incarnation du dieu Vishnu descendu sur terre afin de rétablir le *dharma*¹. En informatique, le terme avatar désigne la représentation d'un utilisateur sur internet, dans les jeux vidéo ou, dans notre contexte, un environnement virtuel immersif. En ce sens, cette figure peut être considérée comme l'incarnation numérique d'un être humain au sein d'un espace simulé. Si initialement l'avatar désignait le personnage d'un joueur dans un monde virtuel, par extension, il est aujourd'hui utilisé dans divers contextes tels que les forums ou réseaux sociaux [Perény, 2013]. Ainsi, bien que le contexte de nos recherches se cantonne à l'étude de personnages 3D humanoïdes, les descriptions textuelles ou l'image représentant un utilisateur sur un site internet et sur diverses applications mobiles peuvent aussi être qualifiées d'avatars [Boberg *et al.*, 2008; Nowak et Fox, 2018].

2.2.2 Dichotomie avatars et agents

Nous venons de décrire l'avatar en informatique comme la figure représentant l'utilisateur au sein d'un espace virtuel. Aussi, il est d'ores et déjà nécessaire d'opérer une dichotomie pour qualifier les personnages d'un même univers de synthèse. Ainsi, nous avons d'une part les avatars et d'autre part les agents. Les avatars sont des entités contrôlées par un humain et répondant aux commandes de ce dernier que ce soit via des interfaces de type manette, clavier

1. Le *dharma* est un terme polymorphe désignant les normes et lois sociales, politiques, familiales, personnelles, naturelles ou cosmiques.

et souris, ou par des interfaces plus complexes telles que les dispositifs de capture de mouvement. Les agents sont quant à eux contrôlés par l'intermédiaire d'algorithmes régissant leurs comportements au sein de l'environnement virtuel, à l'image de ce que nous appelons communément dans le cadre des jeux vidéo des personnages non joueur (PNJ). Les interactions entre avatars dans des espaces en ligne partagés, tels que les jeux massivement multijoueurs, sont donc qualifiées de communications médiatisées par ordinateur [Fox *et al.*, 2014], tandis que les relations avec des agents seront, elles, qualifiées d'interactions humain-ordinateur.

Cette dichotomie entre avatar et agent peut donc actuellement se résumer au simple fait qu'un personnage virtuel soit contrôlé par un humain ou par des algorithmes régissant le comportement d'une entité autonome. Cependant, l'évolution des technologies et l'essor actuel de l'intelligence artificielle nous invitent à la réflexion sur les limites de ce que nous pouvons, et de ce que nous pourrions, considérer comme des entités conscientes. Bien qu'il ne soit pas aujourd'hui question de spéculer sur l'avenir de l'intelligence artificielle et sur la place que celle-ci occupera dans la société, cette technologie véhicule avec elle nombre de questions éthiques à la croisée entre science-fiction, culture populaire et réalité scientifique. Si à l'avenir l'évolution de l'intelligence artificielle atteint le stade de ce que nous pourrions qualifier d'« état de conscience », alors devons-nous considérer et traiter ces entités autonomes, potentiellement affectées au contrôle d'humains virtuels, comme des agents ou des avatars ? Par extension, la frontière entre avatars et agents est-elle biologique ou doit-elle être définie par ce que nous appelons la conscience ? Nous n'avons pas pour prétention d'apporter des éléments de réponse à ces réflexions à caractère philosophique dans le cadre des travaux menés dans cette thèse. Cependant, la question mérite d'être posée de par les enjeux sociétaux qu'elle véhicule, car nous serons irrémédiablement confrontés à ce type de considération à l'avenir.

Les études menées dans le cadre de notre projet de recherche se focalisent ainsi essentiellement sur la notion d'avatar. Nos investigations concernent la relation entretenue entre un utilisateur et son avatar dans le cadre d'applications de réalité virtuelle immersives et interactives.

2.2.3 Identification, sélection et personnalisation

Les réflexions et les études empiriques menées dans le cadre de cette thèse portent sur l'impact de la fidélité visuelle des avatars en environnements virtuels immersifs. En amont de ces questionnements, la littérature portant notamment sur l'étude du jeu vidéo permet d'identifier certains mécanismes à l'œuvre dans les processus d'identification, de sélection et de personnification des avatars. L'étude proposée par Taylor [2002a] soulève des questions

théoriques sur la relation entre utilisateurs et avatars. Cette étude s'intéresse particulièrement au contexte social et à la création d'identité digitale en rapportant les propos de joueurs utilisant l'environnement multijoueur en ligne *The Dreamscape*². L'étude illustre différents modes de fréquentation de cet univers en ligne et relate des comportements propres à différentes situations, notamment en matière de vie sociale, de communication, d'interaction, de sexualité, d'identité, etc. Les entretiens menés avec les utilisateurs révèlent que certains joueurs s'identifieraient plus à leur avatar qu'à leur propre image. Cet effet pourrait être notamment lié au fait que ces derniers passent plus d'heures à observer leur corps virtuel que leur propre reflet, tel qu'on peut le voir face à un miroir. Par ailleurs, beaucoup d'utilisateurs estiment que leurs avatars retranscrivent une meilleure version d'eux-mêmes. Dans ce contexte, la personnalisation de l'avatar est une phase essentielle à laquelle les joueurs consacrent beaucoup de temps, dès lors que le jeu ou l'environnement en ligne permet d'éditer l'apparence des personnages. Cette activité joue un rôle déterminant dans le processus permettant à l'avatar de devenir un « individu », de faire de son corps une « réalité ». Ce qui semble importer aux utilisateurs interrogés concerne la capacité de leur représentation à permettre la projection et l'immersion dans l'environnement. L'induction de ce sentiment semble être dû en grande partie à la capacité du corps virtuel à favoriser la construction, l'expression et l'interprétation de l'identité que les joueurs recherchent. L'acte de création de l'avatar repose donc sur l'atteinte du stade du « c'est moi ». Cette analyse rejoint les constats réalisés préalablement par Messinger *et al.* [2008] démontrant que les utilisateurs du métavers³ *Second Life*⁴ ont tendance à personnaliser leur avatar afin de créer une version améliorée d'eux-mêmes, les rendant ainsi plus attractifs à leurs yeux et à ceux de la communauté.

Par ailleurs, l'étude de Aymerich-Franch [2015] démontre que les utilisateurs choisissent majoritairement des avatars à l'apparence extravertie indépendamment de leur personnalité réelle évaluée par un score d'extraversion. En revanche, la situation proposée au sein de l'environnement virtuel semble influencer le choix de l'avatar (situation formelle/informelle). Sur un plan comportemental, l'attitude des joueurs serait similaire à leur comportement réel, mais avec moins d'inhibition. Les résultats des travaux de Messinger *et al.* [2008] démontrent ainsi que l'on observe des comportements exacerbés chez les joueurs, notamment en matière d'extraversion. Cependant, l'étude de McCreery *et al.* [2013] révèle que les comportements

2. *The Dreamscape* est un *chat* en ligne graphique basé sur la plateforme *WorldsAway* sortie en 1995 et développé par des membres de l'équipe d'*Habitat*, premier environnement en ligne massivement multijoueur développé par LucasArt en 1986.

3. Contraction de méta-univers, le terme métavers fut introduit par Neal Stephenson dans son roman *Snow Crash (Le samouraï virtuel)*, paru en 1992, pour désigner un monde virtuel fictif hébergeant une communauté d'utilisateurs.

4. *Second Life* est un métavers 3D sorti en 2003 édité et développé par la société Linden Lab. Dans cet univers les joueurs incarnent un avatar personnalisable et peuvent créer et éditer le contenu de l'environnement virtuel.

sociaux réels des joueurs finissent par ressortir au sein l'environnement virtuel. Cet alignement de la personnalité serait lié à notre incapacité à moduler notre comportement continuellement, notamment à cause de la charge cognitive requise.

Au regard des constats de ces études, les joueurs et utilisateurs de mondes virtuels semblent vouloir s'identifier à leur avatar, à vouloir faire de ce dernier une sorte d'alter-ego numérique pouvant être considéré comme une version améliorée d'eux-mêmes. Cependant, la fréquentation soutenue d'environnements en ligne permet aux joueurs les plus assidus de créer plusieurs avatars afin de leur prêter une personnalité et une individualité propre. La forme la plus exacerbée de ce type de comportement peut notamment s'observer au sein des communautés de rôlistes⁵ [Taylor, 2002a]. Dans ce contexte, seule une facette de la personnalité du joueur serait incarnée par chacun de ses avatars. Chaque facette peut ainsi être expérimentée et exacerbée dans des proportions différentes grâce à l'anonymat octroyée par le monde virtuel. Ainsi, l'avatar agit comme un persona de l'utilisateur au sens originel du terme faisant référence aux masques antiques de l'acteur, du comédien. Par extension, ce terme fut adapté à la psychologie analytique par Carl Gustav Jung [Baudouin, 1963] pour désigner l'adaptation de l'être humain en société. Dans ce contexte on parlera alors de masque social. Les travaux de Morie [2008] présentent ainsi l'avatar comme un moyen permettant l'expression des multiples facettes de la personnalité du joueur. Ainsi, si l'avatar peut être un moyen d'incarner une version similaire ou idéalisée de soi-même, il constitue aussi un moyen d'explorer d'autres aspects de notre personnalité profonde.

2.2.4 Avatars et environnements virtuels immersifs

Le changement de paradigme actuel de la réalité virtuelle, porté depuis quelques années par l'arrivée de casques abordables sur le marché grand public, implique de considérer et de poursuivre les recherches sur la notion d'avatar. Les systèmes de réalité virtuelle immersifs, notamment dans un contexte industriel, ont longtemps été dominés par les CAVEs (*Cave Automatic Virtual Environment*) [Cruz-Neira *et al.*, 1993]. Ces installations, composées de trois à six surfaces de projection, permettent d'immerger l'utilisateur dans un environnement virtuel grâce à un rendu stéréoscopique, ainsi qu'à un tracking de position et d'orientation du regard (Figure 2.1). Ce type d'installation s'avère cependant onéreux, avec des tarifs variant de quelques dizaines à plusieurs centaines de milliers d'euros. Si ces systèmes continuent de susciter l'intérêt des industries pouvant investir dans ce type d'installation, l'arrivée des

5. L'interprétation d'un rôle (*role playing*) est l'ensemble des apports créatifs, personnels et perceptibles d'un participant, pour le jeu du personnage qu'il interprète. L'interprétation résulte du choix de comportements, d'états et de pensées que le participant réalise pour le personnage et qu'il exprime aux autres participants.

casques et la flexibilité offerte par ce type de matériel abordable, transportable et qualitativement en constante progression, transforme le marché de la réalité virtuelle.

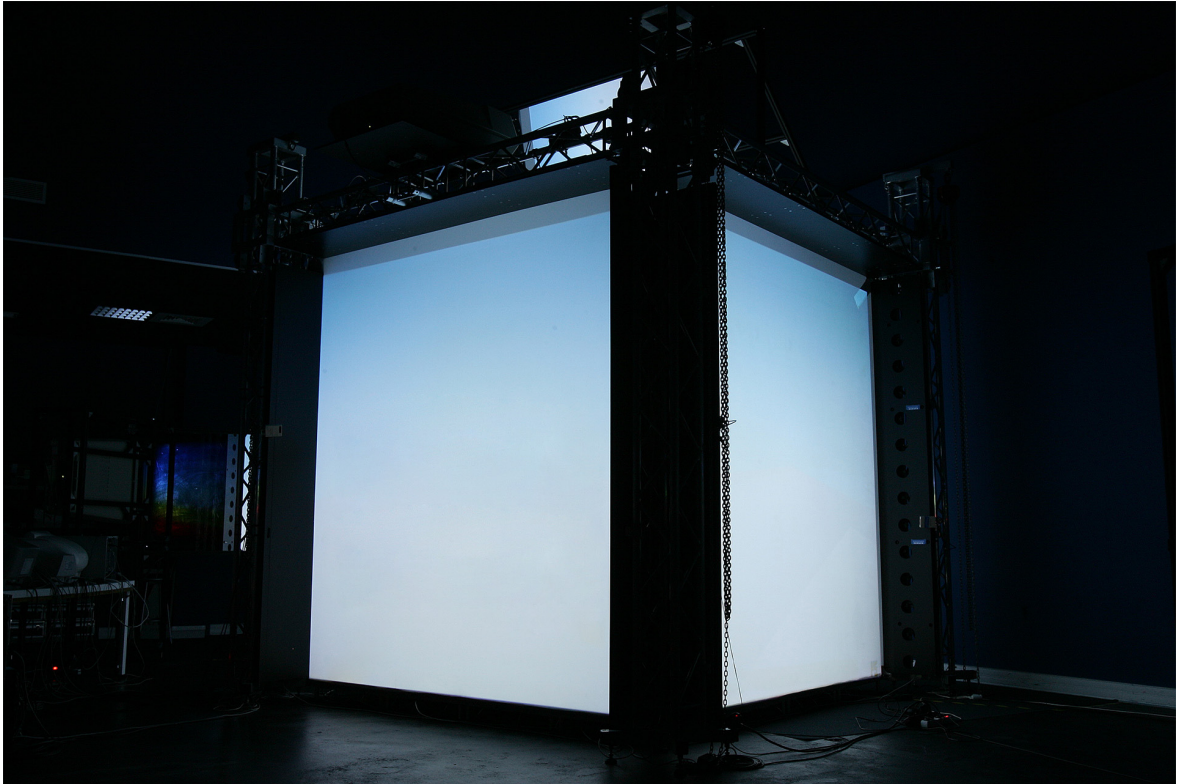


FIGURE 2.1 – CAVE à 4 faces © CLARTE 2007.

Ces évolutions technologiques impliquent de nouvelles considérations en matière d'interaction entre l'homme et la machine. En effet, si le CAVE permet à l'utilisateur de conserver la conscience de son corps sur un plan visuel et proprioceptif, en revanche, l'utilisation d'un casque et l'occultation complète du monde réel en résultant ne permet pas de percevoir notre corps en action. Ce changement de paradigme justifie et implique la considération de solutions pouvant influencer l'expérience du rapport au corps lors de l'utilisation de casques immersifs. Si au premier abord, l'occultation de l'environnement réel semble être une entrave à la conscience corporelle, l'utilisation d'un casque couplé à un système de capture de mouvement permet d'envisager de nouveaux cas d'usage. Dans ces conditions, il devient possible de contrôler des corps virtuels aux caractéristiques morphologiques diverses et variées, avec des potentialités à identifier pour l'expérience utilisateur. C'est précisément dans ce contexte que se positionnent nos réflexions ainsi que nos investigations empiriques ayant pour objectif d'évaluer l'impact de la fidélité visuelle des avatars [Garau, 2003] sur le sentiment d'incarnation [Kilteni *et al.*, 2012] et sur le comportement des utilisateurs [Yee et Bailenson, 2007].

2.3 Expérience utilisateur

Le progrès constant des technologies et la démocratisation des systèmes de réalité virtuelle engendrent une transformation du marché et des pratiques nous invitant à reconsidérer la manière de penser et de concevoir les expériences en environnement virtuel. Si par le passé, les préoccupations principales des équipes de développement concernaient essentiellement des problématiques techniques, aujourd'hui l'évolution et la simplification des processus de mise en œuvre des dispositifs de réalité virtuelle entraînent de nouvelles considérations. L'objectif ne réside plus dans la simple production de systèmes opérationnels, mais dans le développement d'applications qui se démarquent par leurs usages au travers des univers et des activités simulés offrant des niveaux d'interactivité inédits. Ainsi, les préoccupations des concepteurs et développeurs de systèmes immersifs en viennent à se focaliser sur le concept fondamental d'expérience utilisateur (*User Experience*).

Ce chapitre présente l'origine et la définition standardisée de l'expérience utilisateur, puis restitue une synthèse des modèles existants appliqués aux environnements virtuels immersifs⁶. Nous aborderons ensuite l'ensemble des composantes de l'expérience utilisateur étudiés dans le cadre de nos recherches, notamment les notions d'immersion, de présence et d'incarnation.

2.3.1 Utilisabilité et expérience utilisateur

La notion d'expérience utilisateur repose initialement sur le concept d'utilisabilité. D'après la norme ISO 9241-11 (2018-03) proposée par l'organisation internationale de normalisation (*International Standard Organisation - ISO*), l'utilisabilité se définit comme « le degré selon lequel un produit peut être utilisé, par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié ». Les travaux de conceptualisation de Hassenzahl *et al.* [2000] proposent une cartographie des qualités pouvant impacter l'attrait d'un système interactif. Nous retrouvons au sein du modèle proposé l'ensemble des qualités ergonomiques, comprenant les critères d'utilisabilité tels que l'efficacité ou l'efficience. Le second aspect du modèle concerne quant à lui l'ensemble des qualités hédoniques du système afférentes au ressenti subjectif de l'utilisateur, notamment au plaisir à l'usage. L'émergence du concept d'expérience utilisateur permet alors d'étendre le concept d'utilisabilité en considérant les dimensions affectives et subjectives de l'utilisateur dans le cadre des interactions homme-machine. Le caractère pluridisciplinaire de l'expérience

6. Se référer aux travaux de Tcha-Tokey [2018] pour une revue de littérature étendue sur les modèles d'expérience utilisateur.

utilisateur ne permet pas d'identifier une définition consensuelle au sein de la littérature. Cependant, le standard ISO 9241-11 (2018-03) en propose la définition suivante :

L'expérience de l'utilisateur est définie comme les perceptions et réactions d'une personne qui résultent de l'utilisation effective et/ou anticipée d'un système, produit ou service. L'expérience de l'utilisateur met l'accent sur les préférences, attitudes, émotions et réactions physiques et psychologiques de l'utilisateur se produisant avant, pendant et après l'utilisation (y compris la perception de confiance, de sécurité, de sûreté et de respect de la vie privée). Une expérience positive de l'utilisateur peut créer de la valeur pour l'utilisateur et/ou l'organisme qui fournit le système interactif.

La relation entre l'utilisabilité et l'expérience utilisateur est illustrée par l'annexe A de la norme ISO 9241-11 (2018-03), notamment lorsqu'est abordée la conception centrée sur l'humain [Draper et Norman, 1986] ayant pour objectif d'améliorer l'utilisabilité des systèmes interactifs. Cette même annexe explicite la notion de satisfaction de l'utilisateur permettant de qualifier la qualité de l'expérience proposée par un système interactif :

L'utilisabilité est un facteur important dans la conception centrée sur l'opérateur humain, comme l'explique l'ISO 9241-210. La conception centrée sur l'opérateur humain utilise le concept d'utilisabilité (y compris des mesures de l'utilisabilité) dans ses activités. L'application d'une conception centrée sur l'opérateur humain permet d'obtenir une vaste gamme de résultats et de bénéfices, y compris une amélioration de l'utilisabilité, de l'accessibilité et de l'expérience de l'utilisateur, et une réduction du risque de non-satisfaction des exigences des parties prenantes par le produit.

Dans le cadre de la qualité centrée sur l'opérateur humain, l'expérience de l'utilisateur est le degré de satisfaction des exigences relatives à des perceptions et réactions spécifiques qui résultent de l'utilisation du système interactif. La satisfaction inclut le degré selon lequel l'expérience de l'utilisateur qui résulte d'une utilisation réelle répond aux besoins et attentes de l'utilisateur. Une expérience particulière de l'utilisateur peut être un objectif.

Si les concepts d'utilisabilité et d'expérience utilisateur s'avèrent corrélés, cette dernière accorde néanmoins une importance fondamentale à la subjectivité de l'expérience, au ressenti

de l'utilisateur. Dans ce contexte, les notes explicatives de la norme ISO 9241-11 (2018-03) apportent des précisions sur la nature des perceptions et des réactions considérées :

Les perceptions et réactions de l'utilisateur incluent les émotions, convictions, préférences, perceptions, confort, comportements et réalisations de ce dernier qui interviennent avant, pendant et après l'utilisation. L'expérience de l'utilisateur est une conséquence de l'image de marque, de la présentation, de la fonctionnalité, des performances, du comportement interactif et des capacités d'assistance d'un système, produit ou service. Elle résulte également de l'état intérieur et physique de l'utilisateur résultant d'expériences passées, de ses attitudes, de ses compétences, de ses capacités et de sa personnalité, ainsi que du contexte d'utilisation.

Au regard de ces définitions, nous pouvons constater que si la majorité des critères de l'utilisabilité peut être évaluée de manière objective, les dimensions émotionnelles et psychologiques de l'expérience utilisateur demeurent en revanche particulièrement sensibles aux caractéristiques propres à chaque individu. En cela, son étude implique d'adopter une approche phénoménologique qualitative permettant l'analyse de l'expérience subjective vécue par chaque participant. Ainsi, nous présenterons les outils d'évaluation mis en place lors de nos expérimentations pour évaluer les composantes de l'expérience utilisateur dans le chapitre dédié à la méthodologie (Chapitre 3).

Au travers de cette partie introductive, nous venons d'identifier l'origine de la notion d'expérience utilisateur et sa définition normalisée. Dans la suite de ce chapitre, nous allons nous intéresser aux modèles dédiés aux applications interactives et aux environnements virtuels immersifs, afin d'identifier les dimensions de l'expérience utilisateur qui seront étudiées dans le cadre de nos recherches. La partie suivante restitue et confronte ainsi les composantes et les interdépendances des modèles identifiés dans la littérature.

2.3.2 Modèles d'expérience utilisateur dédiés aux environnements virtuels immersifs

La modélisation de l'expérience utilisateur en environnement immersif fait l'objet d'investigations pluridisciplinaires. Au-delà de l'informatique, l'applicabilité multiple des dispositifs de réalité virtuelle implique des dimensions psychologiques, ergonomiques, etc. Ainsi, les tentatives de modélisation « holistique » de l'expérience utilisateur illustrent la pluralité des facteurs à considérer.

De nombreux modèles ont émergé ces dernières années avec pour objectif la définition et la catégorisation des composantes permettant de qualifier l'expérience vécue lors de l'utilisation de médias interactifs [Pallot *et al.*, 2013; Takatalo *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2009] ou plus spécifiquement en environnements virtuels [Cheng *et al.*, 2014; Lin et Parker, 2007; Shin *et al.*, 2013; Tcha-Tokey, 2018]. La définition et la stabilisation de ces modèles font toujours l'objet de discussions au sein des différentes communautés étudiant ces concepts (réalité virtuelle, jeu vidéo, etc.). Ces études sont néanmoins parvenues à identifier différents facteurs prépondérants tels que la présence, l'immersion, l'engagement ou encore le flow. Le tableau 2.1 présente une synthèse des différents facteurs composant les modèles identifiés et met en évidence les éléments communs de ces modèles d'expérience utilisateur. Ces modèles ambitionnent de qualifier et de définir l'ensemble des facteurs affectant l'expérience utilisateur pour les applications immersives permettant ainsi de définir un cadre théorique global. Dans ce contexte, nos travaux concernent spécifiquement l'étude de la notion de présence et ses sous-composantes que nous présenterons et discuterons dans la suite de ce chapitre. Nous identifierons notamment les intrications entre présence et incarnation en environnement virtuel immersif. À l'issue d'une revue de la littérature abordant ces concepts, nous proposerons de synthétiser et d'agréger les modèles existants au sein d'un méta-modèle servant de base théorique au développement d'un questionnaire exploité dans le cadre de nos expérimentations.

TABEAU 2.1 – Synthèse des composantes de modèles d'expérience utilisateur dédiés aux environnements virtuels immersifs.

	Lin et Parker [2007]	Shin <i>et al.</i> [2013]	Cheng <i>et al.</i> [2014]	Tcha-Tokey [2018]
Présence / téléprésence	X	X	X	X
Immersion	X	X		X
Engagement	X			X
Attention			X	X
Flow		X	X	X
Défi			X	
Émotion				X
Satisfaction	X	X		
Plaisir / affect positif	X		X	
Divertissement	X			
Utilisabilité		X		X
Compétence			X	X
Facilité d'utilisation perçue		X		
Jugement				X
Adoption / fidélisation			X	X
Confirmation		X		
Intention d'utiliser		X		
Conséquence de l'UX				X
Mal des environnements virtuels	X			

2.3.3 Présence

L'observation des modèles d'expérience utilisateur dédiés aux environnements virtuels permet d'identifier certaines notions prépondérantes. La présence est ainsi commune aux quatre modèles comparés et s'avère centrale dans la cadre de nos recherches portant sur les avatars. Cette notion s'avère complexe et non exclusive aux environnements virtuels. Littéralement, la définition de la présence renvoie au fait pour quelqu'un ou quelque chose de se trouver physiquement, matériellement en un lieu déterminé, par opposition à l'absence. Sur un plan psychologique, afin de conceptualiser le sentiment présence appliquée à un média (virtuel ou non), nous devons accepter le fait que cette notion ne soit pas binaire. En effet, le sentiment de présence oscille entre « réalité primaire », réalité où nous vivons chaque jour, et « réalité médiatisée » [Pillai *et al.*, 2013], soit ici dans notre contexte de recherche, la réalité virtuelle. Étudier un tel sentiment revient donc à essayer de déterminer par quelle réalité l'utilisateur s'avère principalement affecté. Le terme présence revêt aujourd'hui différentes acceptions. Dès 1980, Minsky [1980] introduira la notion de téléprésence, relative à une situation de téléopération ou de contrôle à distance. Ultérieurement, Sheridan [1992] proposera le terme de « présence virtuelle » contextualisant ainsi la notion de présence aux espaces numériques. Lombard et Ditton [1997] assimileront quant à eux la présence à l'illusion de non-médiation. Bien qu'à l'heure actuelle il soit encore difficile d'observer un consensus, notamment à cause du caractère pluridisciplinaire des études sur le sujet, il est néanmoins communément accepté de définir la présence comme le sentiment « d'être là » (« *Being there* ») [Heeter, 1992; Slater *et al.*, 1994]. Ces théorisations de référence des années 90 ont contribué au fondement et à l'ancrage de la notion de présence, faisant de celle-ci un objet d'étude toujours sujet à de nombreuses investigations.

Le concept de présence, tel que nous venons de l'introduire, s'est vu proposer différentes catégorisations que nous détaillerons par la suite. Avant de poursuivre notre analyse des composantes internes constituant la présence, il semble nécessaire d'évoquer et de considérer les incidences de notions indissociables telles que l'immersion, chère au domaine de la réalité virtuelle.

Immersion et présence

La présence étant une des multiples dimensions de l'expérience utilisateur en environnement virtuel, elle est par définition intrinsèquement liée à d'autres notions, telle que l'immersion. Dans le cadre de la réalité virtuelle, le terme immersion est employé telle une métaphore faisant référence à l'action d'immerger, de plonger un objet ou une personne dans un liquide.

Dans notre contexte, ce terme fait donc référence au fait d'inclure l'utilisateur au sein d'un environnement simulé. Si au premier abord le concept d'immersion semble aisément compréhensible, notre revue de littérature illustre la divergence des définitions proposées. Bien que très fortement liée à la présence, elle revêt des significations variables suivant les auteurs et suscite également de nombreux débats au sein de la communauté scientifique. Afin de circonscrire le cadre théorique de nos recherches, nous proposons de restituer dans un premier temps les deux axes majeurs identifiés que sont l'immersion psychologique et l'immersion perceptuelle. Suite à la présentation de ces notions, nous expliciterons notre positionnement afin de poursuivre l'analyse de la relation entre les notions d'immersion et de présence en identifiant leurs influences mutuelles.

Dans le cadre des recherches portant sur les environnements virtuels immersifs, Slater *et al.* [2009a] définissent et considèrent le niveau d'immersion d'un système par le nombre de canaux de données sensorielles générés et la mesure dans laquelle les données sensorielles sont délivrées conformément aux capacités et aux attentes de notre appareil sensoriel. La définition d'immersion proposée est ainsi afférente aux propriétés techniques d'un système :

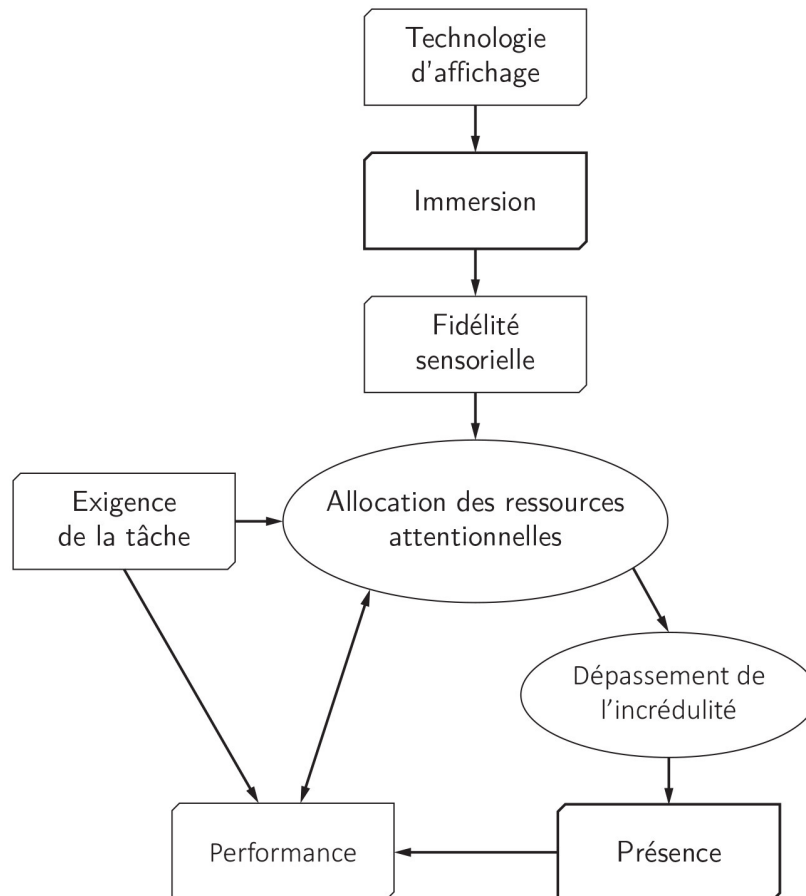
Façon selon laquelle un système fournit un environnement englobant, excluant les sensations du monde réel, accueillant de nombreuses modalités sensorielles, possédant une riche capacité de représentation. [Slater, 1999; Slater et Wilbur, 1997] [Traduction].

D'après cette définition, le niveau d'immersion proposé par un système de réalité virtuelle peut-être qualifié suivant ses caractéristiques matérielles et logicielles. Ainsi, les stimulations sensorielles, visuelles, haptiques, etc. participent au niveau d'immersion perceptuelle, au même titre que le rendu graphique ou sonore [Cummings et Bailenson, 2016]. Cette proposition technocentrée de l'immersion diverge partiellement avec le concept d'immersion psychologique de Witmer et Singer [1998]. Bien que la définition proposée par ces derniers fasse référence à la richesse des stimuli induits par l'environnement, elle demeure néanmoins centrée sur les réactions de l'utilisateur et donc sur le versant psychologique de l'expérience :

L'immersion est un état psychologique caractérisé par le fait de se percevoir soi-même enveloppé par, inclus dans, et interagissant avec un environnement fournissant un flux continu de stimuli et d'expériences. Un environnement virtuel produisant un plus grand sentiment d'immersion produira des niveaux plus élevés de présence. [Witmer et Singer, 1998] [Traduction].

Afin de limiter le recouvrement des concepts et l'ambiguïté entourant cette notion, Slater [1999] proposera une extension de sa définition d'immersion, considérant les aspects matériels et logiciels d'un système, qu'il intitulera « immersion technologique ». Ses réflexions démontreront par ailleurs la porosité de la frontière entre les concepts de présence et d'immersion psychologique proposés par Witmer et Singer [1998]. Par ailleurs, les travaux ultérieurs de McMahan [2003] portant sur les jeux vidéo illustrent également ces deux versants de l'immersion perceptuelle et psychologique. D'après l'auteur, l'immersion perceptuelle résulte de la substitution des sensations du monde réel par celles du monde virtuel. En cela, cette définition rejoint la notion d'immersion technologique proposée dans les travaux de Slater [1999]. Toujours selon McMahan [2003], l'immersion psychologique correspondrait quant à elle à l'absorption mentale de l'utilisateur au niveau diégétique, c'est-à-dire la sensation pour l'utilisateur de faire partie de l'action, de prendre part aux événements se déroulant au sein de l'environnement virtuel. Au regard de ces définitions, bien que leurs positionnements soient fondamentalement différents, l'analyse des études préalables semble démontrer que l'immersion, qu'elle soit perceptuelle ou psychologique, impacte favorablement le sentiment de présence de l'utilisateur au sein des environnements virtuels. Dans le cadre de nos travaux de recherche portant sur la réalité virtuelle, nous choisissons d'adopter la définition d'immersion perceptuelle. Le terme « immersion » sera dès lors utilisé dans la suite de ce manuscrit pour décrire la capacité technique d'un système à immerger l'utilisateur au sein d'un environnement virtuel.

Le modèle Immersion, Presence, Performance (IPP) proposé par Bystrom *et al.* [1999] illustre le lien existant entre immersion et présence (Figure 2.2). Celui-ci souligne l'influence des composantes technologiques d'un système sur la fidélité des stimulations sensorielles générées par le dispositif sur l'utilisateur. Il illustre également la nécessité d'une allocation d'attention suffisante de la part de l'utilisateur lui permettant de faire abstraction des incohérences de l'environnement virtuel, facilitant ainsi l'émergence du sentiment de présence.

FIGURE 2.2 – Modèle Immersion, Presence, Performance (IPP) [Bystrom *et al.*, 1999] [Traduction].

De par son impact sur le sentiment de présence, la notion d’immersion et le recensement des facteurs technologiques l’influençant se doivent d’être considérés dans nos réflexions. Ainsi, suite à une première ébauche [Cummings *et al.*, 2012], Cummings et Bailenson [2016] proposent une méta-analyse répertoriant 83 études permettant la classification des facteurs impactant l’immersion en environnement virtuel. Les études recensées par cette méta-analyse sont catégorisées et comparées sur la base des huit critères suivants :

- **Capture de mouvement** : nombre et type de degrés de liberté avec lesquels les mouvements d’un utilisateur sont capturés dans un système. Ce critère comprend également la qualité et la méthode de capture (mouvement naturel *versus* contrôleur).
- **Vision** : comparaison de systèmes basés sur une vision stéréoscopique et monoscopique.
- **Champ de vision** : taille et ouverture du champ de vision dans un affichage tête haute. Sont également incluses les études portant sur la dimension et la distance de perception d’un écran de télévision ou d’ordinateur.
- **Taux de rafraîchissement** : nombre d’images par seconde calculées par le système pour le rendu de l’affichage des environnements virtuels.
- **Qualité de l’image** : éléments influençant la qualité générale du rendu de l’envi-

ronnement virtuel tels que le réalisme ou la fidélité des visuels. La manipulation de ces caractéristiques inclut la comparaison de différentes résolutions, de l'éclairage, des textures, du niveau de détail, etc.

- **Qualité du son** : présence ou absence de son, son ambiant, spatialisation des sources sonores, présence de son diégétique et nombre de canaux utilisés.
- **Point de vue** : Comparaison entre le point de vue à la première personne permettant de visualiser l'environnement au travers des yeux du personnage et la troisième personne permettant de visualiser l'environnement depuis un point de vue distant situé derrière le personnage.
- **Conditions d'immersion globales** : catégorie dédiée aux études comparant de multiples conditions pouvant impacter l'immersion simultanément et ne permettant pas d'identifier avec précision les critères déterminants.

Les résultats de cette méta-analyse permettent d'identifier et de prioriser les aspects d'un système impactant fortement l'immersion, et incidemment la présence. Ainsi, les facteurs les plus impactants semblent ici être ceux liés aux stimulations sensorielles telles que la capture de mouvement (synchronisation visuomotrice) et aux paramètres d'affichage tels que la vision stéréoscopique, le champ de vision et le taux de rafraîchissement. Les qualités visuelles et sonores de l'environnement virtuel semblent quant à elles avoir une incidence plus modérée sur l'immersion. Par ailleurs, bien que la notion de point de vue soit un des critères de comparaison de cette analyse, la faible quantité d'études recensées sur le sujet ne permet pas de tirer des conclusions précises par manque de références. En effet, seules les études de Kallinen *et al.* [2007] et de Lim et Reeves [2009] figurent dans les données de l'analyse. Ce constat conforte le positionnement de notre première expérimentation dédiée à l'analyse de l'impact du point de vue en environnement virtuel immersif (Chapitre 4).

Catégorisation de la présence

Nous venons d'introduire les notions de présence et d'immersion en illustrant leur interdépendance et l'importance de ces dernières pour l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif. Cette revue de la littérature nous a permis de révéler les paramètres impactant l'immersion technologique, aspect de la notion d'immersion que nous considérerons dans le cadre de nos recherches. Dans la suite de ce chapitre, nous allons mettre en évidence qu'à l'instar de l'immersion, le sentiment de présence est également constitué de sous-dimensions qu'il convient d'analyser. En effet, à la lecture des articles portant sur la notion de présence, nous pouvons constater que le terme s'avère souvent décliné et contextualisé en fonction des champs disciplinaires. Ainsi, il est fréquent d'être confronté aux terminologies suivantes :

téléprésence, présence virtuelle, présence médiatisée, etc. De plus et au-delà des différentes terminologies employées, plusieurs typologies de la présence ont été introduites sans qu'un consensus ne soit établi [Biocca, 1997; Heeter, 1992; Lee, 2004; Lombard et Ditton, 1997]. Préalablement à l'explicitation de notre positionnement, nous proposons d'établir une synthèse de ces typologies (Tableaux 2.2 et 2.3).

TABLEAU 2.2 – Synthèse de différentes catégorisations de la présence proposées par Biocca [1997]; Heeter [1992]; Lee [2004]; Lombard et Ditton [1997] (partie 1).

Heeter [1992]	
Présence environnementale (<i>Environmental Presence</i>)	Mesure suivant laquelle l'environnement lui-même semble savoir que vous êtes là et semble réagir en fonction de vous.
Présence sociale (<i>Social Presence</i>)	Mesure suivant laquelle d'autres êtres (vivants ou synthétiques) existent également dans le monde et semblent réagir en fonction de vous.
Présence personnelle (<i>Personal Presence</i>)	Raisons et mesure suivant lesquelles vous vous sentez comme si vous étiez dans un monde virtuel.
Biocca [1997]	
Présence physique (<i>Physical Presence</i>)	Le sentiment d'« être là » est l'état de conscience de base dans lequel l'utilisateur attribue la source de la sensation à l'environnement physique.
Présence sociale (<i>Social Presence</i>)	Le niveau minimum de présence sociale se produit lorsque les utilisateurs sentent qu'une forme, un comportement ou une expérience sensorielle indique la présence d'une autre intelligence. Le niveau de présence sociale est le degré suivant lequel un utilisateur ressent l'accès à l'intelligence, aux intentions et aux impressions sensorielles d'une autre personne.
Présence de soi (<i>Self-presence</i>)	La présence de soi est définie comme l'effet de l'environnement virtuel sur la perception de son corps (c'est-à-dire le schéma corporel ou image corporelle), les états physiologiques, les états émotionnels, les traits perçus et l'identité.
Lombard et Ditton [1997]	
La présence en tant que transport (<i>Presence as Transportation</i>)	La conceptualisation la plus fréquemment utilisée reflète le sentiment de présence suivant lequel les utilisateurs des médias ont l'impression qu'eux-mêmes ou d'autres objets, personnes ou environnements ont été transportés.
La présence en tant que réalisme (<i>Presence as Realism</i>)	La mesure suivant laquelle un média peut produire des représentations apparemment exactes d'objets, d'événements et de personnes; des représentations qui ressemblent, sonnent et/ou semble être la chose « réelle ».
La présence en tant qu'immersion (<i>Presence as Immersion</i>)	La composante physique de l'immersion est la mesure suivant laquelle les sens de l'utilisateur sont étendus dans l'environnement médiatisé et à quel point ces extensions sont naturelles lorsque les sens sont sollicités. La présence en tant qu'immersion comporte également une composante psychologique. Lorsque les utilisateurs ressentent la présence immersive, ils sont impliqués, absorbés, engagés.
La présence en tant que richesse sociale (<i>Présence as Social Richness</i>)	La présence (sociale) est la mesure dans laquelle un média est perçu comme sociable, chaleureux, sensible, personnel ou intime lorsqu'il est utilisé pour interagir avec d'autres personnes.

TABLEAU 2.3 – Synthèse de différentes catégorisations de la présence proposées par Biocca [1997]; Heeter [1992]; Lee [2004]; Lombard et Ditton [1997] (partie 2).

La présence en tant qu'acteur social dans un média (<i>Presence as Social Actor within a Medium</i>)	Illustré par les interactions parasociales, dans lesquelles les utilisateurs des médias réagissent aux signaux sociaux présentés par les personnes qu'ils rencontrent dans un média, même si c'est illogique voire inapproprié de le faire [...]. La nature médiatique de l'« interaction » est ignorée et la personnalité médiatique est perçue à tort comme un acteur social.
La présence en tant que média comme acteur social (<i>Présence as Medium as Social Actor</i>)	Se réfère à un anthropomorphisme du média tel que l'utilisateur perçoit le média lui-même en tant qu'acteur social [...]. Dans ces réponses sociales aux ordinateurs et aux télévisions (et aux robots et androïdes), les utilisateurs ignorent encore une fois, de manière illogique, la nature technologiquement médiatique d'une expérience de communication. Les indices sociaux de base exposés par le média amènent les utilisateurs à le traiter comme une entité sociale.
Lee [2004]	
Présence physique (<i>Physical Presence</i>)	État psychologique dans lequel les objets (para-authentiques ou artificiels) virtuels sont considérés comme des objets réels physiques de manière sensorielle ou non.
Présence sociale (<i>Social Presence</i>)	État psychologique dans lequel les acteurs sociaux (para-authentiques ou artificiels) virtuels sont considérés comme des acteurs sociaux réels de manière sensorielle ou non.
Présence de soi (<i>Self-presence</i>)	État psychologique quand le soi virtuel (para-authentique ou artificiel) est vécu comme le soi réel (corps et/ou identité) de manière sensorielle ou non.

L'observation des propositions de catégorisation de la notion de présence semble révéler des déclinaisons en partie similaires. Cependant, l'analyse des définitions proposées illustre des différences de positionnement. Dans le cadre de nos recherches, nous fonderons notre raisonnement sur la proposition de Lee [2004] définissant la présence comme un état psychologique où la virtualité de l'expérience n'est pas décelée. Ainsi, si nous considérons la présence comme un *continuum* (l'intensité du sentiment de présence étant sujette à des variations continues), alors, à son paroxysme, l'utilisateur ne serait pas en mesure d'identifier la « réalité » dans laquelle il évolue. Cette théorie, construite suite à une revue de littérature extensive sur la notion de présence, permet de palier aux limites des propositions précédentes. La première des limites évoquées par l'auteur concerne les typologies basées sur des domaines déterminés. En effet, certaines définitions ne sont compatibles qu'avec des systèmes avancés (à l'image des systèmes de réalité virtuelle), mais dont l'applicabilité de la catégorisation s'avère limitée pour des médias technologiquement moins évolués. Or, il est possible de ressentir un sentiment de présence en jouant à des jeux vidéo, en regardant la télévision ou une vidéo sur un *smartphone*, en lisant un livre, etc. [Pillai *et al.*, 2013]. La seconde limite évoquée concerne le fait que certaines dimensions des catégorisations proposées antérieurement ne sont pas mutuellement exclusives. Sa réflexion aboutira à la subdivision suivante de la présence :

- **Présence physique** (*Physical Presence*).
- **Présence sociale** (*Social Presence*).
- **Présence de soi** (*Self-presence*).

Cette décomposition de la présence nous semble pertinente, car elle synthétise l'essentiel des dimensions fondamentales auxquelles un utilisateur est confronté lors de l'utilisation d'un média. La présence physique concerne la relation à l'environnement ; la présence sociale émerge de la relation avec les acteurs sociaux (avatars et agents autonomes) ; la présence de soi traite de la construction d'un soi alternatif virtuel, qu'il soit physique ou psychologique (présence d'avatar ou non). La théorie de Lee [2004] propose par ailleurs une catégorisation de la nature de l'expérience virtuelle pouvant être qualifiée de para-authentique, dans la mesure où celle-ci conserve un lien avec le monde réel (visioconférence, téléopération, visite virtuelle d'une entité réelle), ou d'artificielle si cette dernière est dépourvue d'ancrage à la réalité.

Ainsi, dans le contexte de notre étude, la notion d'immersion technologique considérée correspond au nombre de canaux de données sensorielles générées et au degré avec lequel les données sensorielles sont délivrées sous une forme adaptée aux capacités et attentes de notre appareil sensoriel [Slater *et al.*, 2009a]. Les différentes notions de présence, détaillées dans les sections suivantes, s'avéreront quant à elles afférentes à des dimensions psychologiques.

Présence physique

État psychologique dans lequel les objets (para-authentiques ou artificiels) virtuels sont considérés comme des objets réels physiques de manière sensorielle ou non. [Lee, 2004] [Traduction].

D'après cette définition, le sentiment de présence physique se manifeste dès lors que les utilisateurs ne sont plus en mesure d'identifier la nature para-authentique ou artificielle des objets simulés. Le terme objet est ici utilisé par l'auteur pour désigner les éléments virtuels constituant l'environnement, à l'exception de la représentation de l'utilisateur et des entités sociales. Il est à noter que cette définition de la présence physique ne nécessite pas d'avoir la sensation de l'existence d'un soi dans l'environnement virtuel, limitant ainsi l'interdépendance avec le concept de présence de soi présenté ci-après.

Bien qu'initialement non définie en ces termes, la présence physique fait l'objet de la majorité des recherches dans le domaine de la présence en environnement virtuel. En effet, depuis l'introduction du concept, les recherches se sont orientées autour du sentiment « d'être là » (« *being there* ») [Heeter, 1992; Slater *et al.*, 1994]. Ce sentiment sera ultérieurement défini par l'illusion d'être dans un lieu, malgré le fait d'avoir conscience de ne pas y être réellement (« *place illusion* » [Slater, 2009]). D'après Slater [1999], trois aspects sont déterminants dans l'émergence du sentiment de présence physique en environnement virtuel immersif, à savoir :

- Le sentiment « d'être là » dans l'environnement virtuel. [Traduction]
- La façon selon laquelle l'environnement virtuel devient dominant, tel que les utilisateurs auront tendance à répondre à des événements dans l'environnement virtuel plutôt que dans le monde réel. [Traduction]
- La façon selon laquelle les utilisateurs, après l'expérience dans l'environnement virtuel, se rappellent avoir visité un endroit plutôt que d'avoir simplement vu des images d'un monde généré par ordinateur. [Traduction]

Le sentiment de présence physique ne nécessite pas un haut niveau de fidélité avec la réalité physique, mais plutôt que les utilisateurs substituent les données sensorielles virtuellement générées aux données réelles aux niveaux inconscient (physiologie, réflexes) et conscient (comportement). Pour ce faire, un système de réalité virtuelle interactif se doit de disposer d'une boucle sensorimotrice à faible latence. Le niveau d'immersion proposé par ce système doit permettre de générer des images plausibles par rapport à la distribution probable d'images de scènes naturelles, conduisant ainsi à des réponses réalistes aux données sensorielles virtuelles.

Enfin, le sentiment de présence physique peut être renforcé et maintenu dans le temps par une corrélation appropriée entre l'état, le comportement, l'activité des participants et leurs conséquences au sein de l'environnement virtuel [Slater *et al.*, 2009a].

Présence sociale

État psychologique dans lequel les acteurs sociaux (para-authentiques ou artificiels) virtuels sont considérés comme des acteurs sociaux réels de manière sensorielle ou non. [Lee, 2004] [Traduction].

Ainsi, le sentiment de présence sociale émergerait lorsque l'utilisateur n'est pas en mesure de déceler la nature para-authentique ou artificielle des entités sociales présentes dans l'environnement virtuel. D'après la définition proposée, ces entités peuvent prendre la forme d'humains médiatisés ou d'acteurs sociaux simulés non humains. Dès lors, la présence sociale ne se limite pas à l'expérience vécue lors de la confrontation à d'autres humains virtuels (avatars ou agents) impliquant une conscience mutuelle de la présence d'autrui. Elle s'éprouve également lors de la confrontation à des éléments ayant impliqué la présence d'une entité sociale, telle que l'écoute d'un enregistrement audio. Ainsi, d'après l'auteur, cette définition de la présence sociale permet d'inclure à la fois les situations de communication à sens unique et à double sens.

Dans le cadre des études portant sur les interactions avec des entités sociales en environnement virtuel, il est fréquent d'être confronté à différentes terminologies qualifiant le sentiment de présence avec autrui (« *Being there with others* ») [Durlach et Slater, 2000] : le sentiment de présence sociale et la co-présence. Le cadre théorique dans lequel nous nous positionnons fait usage de la notion de présence sociale afin d'inclure les situations de communication à sens unique. La co-présence, impliquant une colocalisation et d'une conscience réciproque de la présence d'autrui [Goffman, 1963], fait quant à elle référence au sentiment d'être présent au sein de l'environnement virtuel avec d'autres personnes. Les travaux de Biocca et Harms [2002] illustrent par ailleurs un lien potentiel entre présence sociale et co-présence. D'après la théorie proposée, l'émergence du sentiment de présence sociale repose sur une construction en trois niveaux (se référer aux travaux de Eynard [2016] pour une revue étendue du modèle) :

1. **Niveau perceptuel**, co-présence avec l'incarnation d'autrui.
2. **Niveau subjectif**, accessibilité psycho-comportementale d'autrui : engagement attentionnel, interdépendance émotionnelle perçue, compréhension perçue, interdépendance comportementale.

3. **Niveau intersubjectif**, présence sociale mutuelle : perception individuelle d'une présence sociale mutuelle (symétrie interne des interacteurs), perception d'une présence sociale partagée (symétrie croisée des interacteurs).

Ce modèle théorique diverge partiellement de la proposition de Lee [2004]. En effet, si Biocca et Harms [2002] considèrent la co-présence comme un prérequis à l'induction du sentiment de présence sociale, la théorie de Lee [2004] soutient, elle, la possible occurrence de ce sentiment sans qu'une présence mutuelle ne soit requise.

Si la notion de présence sociale est encore sujette à diverses théorisations et bien qu'elle semble centrale dans le cadre des interactions sociales en environnement immersif, elle ne sera que peu abordée dans ce document. En effet, cette notion reste en marge de nos recherches consacrées à la relation entre l'utilisateur et son avatar. Nous ne nous étendrons donc pas ici sur l'étude de la relation avec les acteurs sociaux.

Présence de soi

État psychologique quand le soi virtuel est vécu comme le soi réel (corps et/ou identité) de manière sensorielle ou non. [Lee, 2004] [Traduction].

D'après cette définition, le sentiment de présence de soi se manifeste dès lors que les utilisateurs n'identifient plus la virtualité de leur représentation para-authentique ou de leur soi alternatif artificiel. Ce sentiment peut donc être vécu de différentes manières suivant le média utilisé. Ainsi un lecteur pourra ressentir un fort sentiment d'identification et de projection lors de la lecture d'un ouvrage, malgré l'absence de stimulations sensorielles [Pillai *et al.*, 2013]. L'apport de cette proposition au regard des définitions antérieures réside dans son applicabilité permettant d'étendre la notion de présence de soi à différents médias, ne cantonnant plus cette définition aux seuls environnements virtuels. Cette définition s'avère néanmoins adaptée aux systèmes technologiquement avancés, à l'image des dispositifs de réalité virtuelle générant des stimulations multisensorielles : visuelles, auditives, haptiques, etc. En cela, cette dernière rejoint la proposition initialement dédiée aux environnements virtuels introduite par Biocca [1997] :

La présence de soi est définie comme l'effet de l'environnement virtuel sur la perception de son corps (c'est-à-dire le schéma corporel ou image corporelle), les états physiologiques, les états émotionnels, les traits perçus et l'identité. [Biocca, 1997] [Traduction].

D'après ces théories, l'expérience et la construction d'un soi alternatif artificiel en environnement virtuel peuvent être ressenties différemment. Ainsi, une manifestation de notre corps physiquement représentée par l'utilisation d'avatars (complets ou partiels) permettrait un transfert par identification, l'identification à l'avatar étant positivement liée à la présence de soi et à la sensation d'être transporté au sein de l'espace simulé [Christy et Fox, 2016]. Il serait également possible de ressentir un sentiment de présence de soi via une projection du point de vue, telle que nous pouvons l'observer actuellement dans de nombreux systèmes de réalité virtuelle ne proposant pas d'entité graphique pour représenter l'utilisateur au sein de l'environnement immersif.

À la lumière des définitions proposées, la notion de présence de soi implique des dimensions d'ordre psychologique, émotionnel et comportemental. Dans le cadre de l'étude des environnements immersifs, d'après Kiltner *et al.* [2012], ces altérations comportementales et émotionnelles seraient les conséquences induites par le sentiment d'incarnation d'un corps virtuel. La suite de ce chapitre est ainsi dédiée à la présentation des mécanismes à l'œuvre dans le processus d'incarnation et aborde les différentes dimensions permettant l'émergence de ce sentiment en environnement virtuel immersif.

2.3.4 Incarnation

Étymologiquement, la racine latine d'incarnation (*incarnatus*) est issue de l'association du préfixe « *in* » (« dans ») et « *caro, carnis* » désignant la chair. L'incarnation fait ainsi référence à l'acte de devenir chair, d'investir un corps. Pragmatiquement, bien qu'il ne soit pas possible de se dissocier physiquement de notre corps réel ni d'en occulter les stimuli provenant du monde extérieur de manière naturelle, il fut néanmoins démontré la possibilité de biaiser notre perception lors d'expérimentations portant sur la perception et la conscience du corps. Ainsi, l'expérience prototypique de la main de caoutchouc (*rubber hand illusion*) a initialement prouvé qu'il était possible d'engendrer une erreur de perception de la position de notre main réelle tout en induisant un sentiment de possession envers une main factice [Botvinick et Cohen, 1998] (nous reviendrons sur les modalités permettant d'induire ce qui sera appelé une dérive proprioceptive (*proprioceptive drift*) lors de la présentation des différentes dimensions du sentiment d'incarnation). L'introduction de ce paradigme initial a ouvert la porte à de nombreuses études en neurosciences ambitionnant d'identifier les mécanismes et aires cérébrales impliqués dans la conscience de soi. Ainsi, l'usage de technologies, notamment des visiocasques et des casques immersifs, permet aujourd'hui aux neuroscientifiques d'investiguer les mécanismes de transfert corporel et de conscience du corps [Ehrsson,

2007; Lenggenhager *et al.*, 2009, 2007; Petkova et Ehrsson, 2008; Petkova *et al.*, 2011]. La mise en évidence de la capacité de notre cerveau à s'attribuer une entité factice ou virtuelle a également ouvert la voie aux études portant sur le processus d'incarnation d'avatars en environnement virtuel. L'incarnation fait ainsi l'objet d'investigations de communautés de chercheurs étudiant différents médias tels que le jeu vidéo [Amato, 2014; Taylor, 2002b] ou la réalité virtuelle [de Vignemont, 2011; Kilteni *et al.*, 2012; Spanlang *et al.*, 2014]. Dans le cadre de nos travaux, nous adopterons la définition proposée par Kilteni *et al.* [2012] faisant aujourd'hui figure de référence dans le cadre des recherches portant sur les environnements virtuels immersifs :

Le sentiment d'incarnation envers un corps B est le sentiment qui émerge lorsque les propriétés de B sont traitées comme si elles étaient les propriétés de notre propre corps biologique. [Kilteni *et al.*, 2012] [Traduction].

La définition proposée souligne ici l'importance et la centralité du corps en évoquant le transfert des propriétés du corps virtuel perçues et interprétées comme celles du corps réel afin de permettre l'émergence du sentiment d'incarnation. La théorie du dilemme du Cyborg (*Cyborg Dylema*) proposée par Biocca [1997] illustre également l'importance et la pluralité des corporéités à l'œuvre dans le processus d'incarnation en environnement virtuel :

1. **Le corps objectif** : corps physique, observable et mesurable de l'utilisateur.
2. **Le corps virtuel** : représentation du corps au sein de l'environnement virtuel.
3. **Le schéma corporel** : modèle mental ou représentation interne du corps.

D'après cette théorie, le succès de l'incarnation en environnement virtuel repose donc sur la capacité de l'utilisateur à transférer son schéma corporel de son corps objectif vers le corps virtuel. Le dilemme évoqué par l'auteur réside ici dans l'oscillation du schéma corporel s'adaptant à l'entité virtuelle contrôlée et pouvant induire en retour des perturbations et des variations de perception du corps réel.

Suite à cette présentation introductive de la notion d'incarnation, nous allons à présent nous intéresser à sa structure sous-jacente. En effet, le processus d'incarnation en environnement virtuel immersif s'avère constitué de trois dimensions que nous étudierons dans le cadre de nos expérimentations : la localisation de soi, le sentiment d'agentivité et le sentiment de possession.

Localisation de soi

La localisation de soi correspond au volume déterminé dans l'espace où l'utilisateur se sent localisé. Plusieurs phénomènes identifiés peuvent altérer ce sentiment de localisation. Les études menées dans le cadre des recherches portant sur les hallucinations autoscopiques et sur les expériences de sortie du corps (Figure 2.3) démontrent qu'une stimulation visuotactile synchrone permet de provoquer un conflit multisensoriel induisant une erreur de localisation [Blanke *et al.*, 2004; Blanke et Mohr, 2005; Cacioppo, 2016; Olivé et Berthoz, 2012]. La manipulation consiste ici à confronter un utilisateur à sa propre image, via un casque restituant le flux vidéo d'une caméra située derrière celui-ci. Une stimulation visuotactile est ensuite répétée sur le corps du participant déclenchant ainsi un conflit sensoriel entre la perception visuelle et les informations tactiles [Blanke et Metzinger, 2009; Ehrsson, 2012; Lenggenhager *et al.*, 2007]. Par ailleurs, les expériences de Thirioux *et al.* [2009, 2010] démontrent qu'il est également possible d'adopter le point de vue d'un agent virtuel, lors d'une confrontation face à face avec celui-ci, via différentes stratégies de projection mentale.

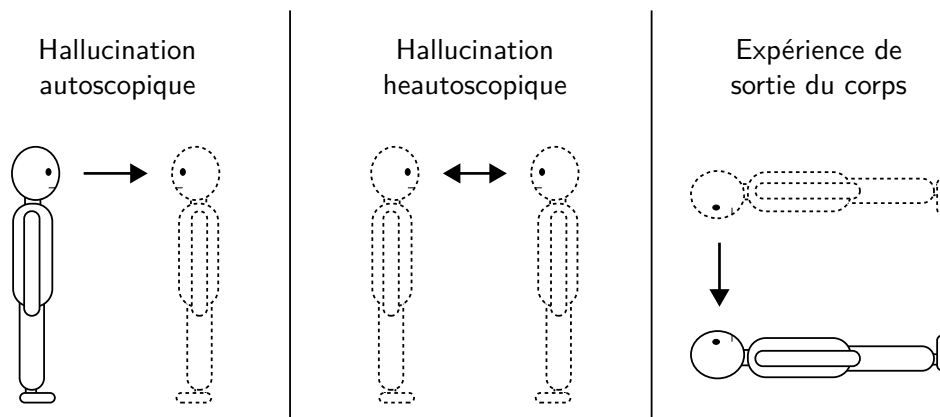


FIGURE 2.3 – Représentation schématique des phénomènes autoscopiques : hallucination autoscopique (gauche), hallucination heautoscopique (centre) et expérience de sortie du corps (droite). La position et la posture du corps physique pour chaque phénomène autoscopique sont indiquées par des lignes noires continues et la position du corps désincarné en lignes pointillées [Blanke et Mohr, 2005].

Le point de vue utilisé dans les mondes virtuels, induit par le positionnement de la caméra, semble également être un facteur déterminant sur la localisation de soi [Debarba *et al.*, 2015; Petkova *et al.*, 2011; Slater *et al.*, 2010]. Bien que certains résultats divergent, de récents travaux démontrent que l'intégration multisensorielle permet d'incarner un avatar virtuel sous différentes conditions de point de vue, mais avec des différences significatives en ce qui concerne la localisation de soi [Debarba *et al.*, 2017].

Agentivité

Dans leurs travaux, Blanke et Metzinger [2009] définissent le sentiment d'agentivité comme le « contrôle moteur global, incluant l'expérience subjective de l'action, le contrôle, l'intention, la sélection motrice et l'expérience consciente de la volonté. » [Traduction].

L'induction du sentiment d'agentivité nécessite une corrélation entre l'intention de l'utilisateur et l'action qui en résulte dans l'environnement virtuel. Ainsi, la correspondance entre les conséquences sensorielles prédites et les conséquences sensorielles réelles induisent une attribution de l'action. Par exemple, il a été démontré que la synchronisation visuomotrice permettait l'induction d'un sentiment élevé d'agentivité via les actions effectuées par le biais d'un avatar virtuel [Debarba *et al.*, 2015] ou de mains robotiques [Caspar *et al.*, 2015]. Dans ce contexte, les participants sont capables de prédire les résultats de leurs mouvements dans l'environnement virtuel grâce à la restitution naturelle de la navigation et des interactions qu'offre le système de capture de mouvement.

Bien que la synchronisation visuomotrice apparaisse comme un procédé efficace, il est démontré que l'attribution d'actions dont résultent des conséquences attendues suffit à induire un sentiment d'agentivité. Ainsi, l'étude de Kokkinara *et al.* [2016] démontre que la colocalisation du point de vue avec un avatar lors d'une phase de navigation dans un environnement virtuel immersif pouvait être suffisante pour que l'utilisateur éprouve un sentiment d'agentivité, même si ce dernier n'effectue pas directement les mouvements du personnage. Des résultats similaires sont également observés dans l'étude de Nagamine *et al.* [2016] portant sur les mouvements d'une main virtuelle.

Les récents travaux de Jeunet *et al.* [2018] permettent d'approfondir la compréhension des mécanismes induisant un sentiment d'agentivité en environnement virtuel. Deux composants sont ainsi identifiés : le sentiment d'agentivité et le jugement de l'agentivité. Ces deux composants reposent notamment sur trois principes :

1. **Priorité** : l'intention consciente d'accomplir un acte doit précéder immédiatement l'action, qui à son tour doit précéder immédiatement le résultat.
2. **Cohérence** : le résultat sensoriel doit correspondre au résultat prédit.
3. **Exclusivité** : la pensée doit être la seule cause apparente du résultat (absence d'influence extérieure).

Possession

Le sentiment de possession concerne l'auto-attribution, par l'utilisateur, du corps virtuel ou de l'entité contrôlés. Ce phénomène fut initialement observé via le paradigme de la main de caoutchouc introduit par Botvinick et Cohen [1998]. Dans cette expérimentation, il fut démontré qu'une stimulation visuotactile synchrone entre une main artificielle et la main réelle du participant permet d'induire un sentiment de possession du membre factice (Figure 2.4). L'émergence du sentiment d'incarnation repose ici sur la stimulation de différents sens participant à la conscience du corps tels que le toucher, la vue et la proprioception. L'illusion est ainsi induite par un conflit multisensoriel duquel résulte un décalage proprioceptif (*proprioceptive drift*).

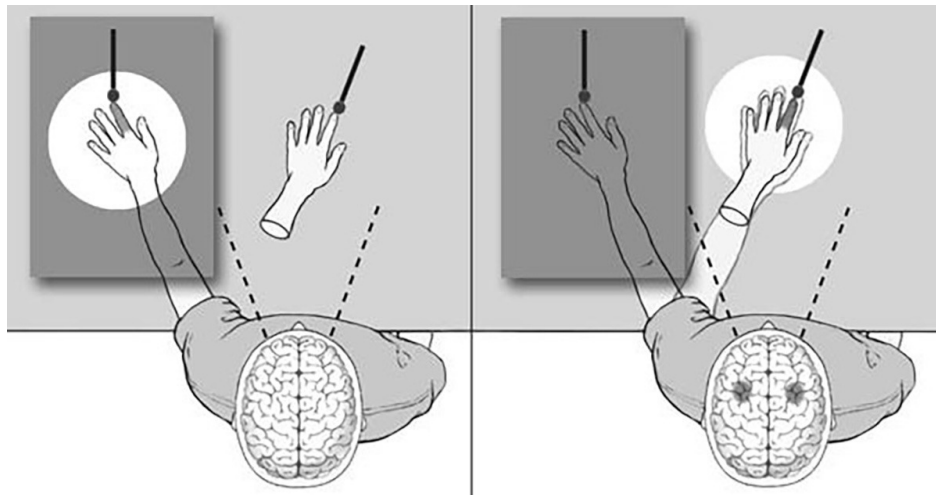


FIGURE 2.4 – Illustration du paradigme de la main de caoutchouc (*Rubber Hand Illusion*). Un sujet en bonne santé fait l'expérience d'un membre artificiel comme faisant partie de son propre corps. Le sujet observe une main humaine factice tandis que sa propre main est cachée (carré gris). Une stimulation visuotactile synchrone est appliquée simultanément sur la main artificielle et sur la main réelle invisible. L'illustration de droite montre l'illusion du sujet alors que les stimulations tactiles sont congruentes avec les coups perçus de la sonde (les zones sombres montrent des zones d'activité accrue dans le cortex pré-moteur ; la position illusoire phénoménalement ressentie du bras est indiquée par le contour bordant la main factice). [Metzinger, 2009]

Ce paradigme, repris et étendu aux environnements virtuels [Slater *et al.*, 2008], démontre la possibilité d'éprouver un sentiment de possession envers un corps virtuel. Ainsi, l'intégration multisensorielle s'avère déterminante dans l'émergence du sentiment de possession permettant d'incarner des avatars aux caractéristiques morphologiques et démographiques différentes [Banakou *et al.*, 2013; Kilteni *et al.*, 2013; Peck *et al.*, 2013; Slater *et al.*, 2010]. Les facteurs *bottom-up* tels que la synchronisation visuotactile [Bovet *et al.*, 2018; Kokkinara et Slater, 2014; Maselli et Slater, 2013; Normand *et al.*, 2011; Slater *et al.*, 2009b] ou la synchronisation visuomotrice [Kokkinara et Slater, 2014; Sanchez-Vives *et al.*, 2010] sont des contributeurs majeurs pour l'induction du sentiment d'incarnation. En effet, le ressenti

proprioceptif lié au mouvement étant un vecteur majeur d'immersion [Cummings et Bailenson, 2016; Slater *et al.*, 2009b], la synchronie visuomotrice joue un rôle prépondérant dans le processus d'identification entre l'utilisateur et l'avatar [Slater *et al.*, 1995]. Par conséquent, l'utilisation d'un système de capture de mouvement temps réel favorise le sentiment de possession d'un corps virtuel.

D'autre part, s'il est reconnu que les facteurs *top-down* comme les similitudes morphologiques et le niveau de réalisme ne sont pas obligatoires pour incarner des personnages virtuels, ils semblent néanmoins avoir un impact positif sur le sentiment de possession [Argelaguet *et al.*, 2016; Latoschik *et al.*, 2017]. De plus, les récents travaux de Waltemate *et al.* [2018] démontrent que la personnalisation des avatars, basée sur l'apparence réelle des utilisateurs, induit également un sentiment de possession plus élevé en environnement virtuel. Cette étude s'appuie sur la métaphore du miroir virtuel et sur un point de vue à la première personne, ces conditions étant connues pour induire un sentiment d'incarnation élevé [Maselli et Slater, 2013; Slater *et al.*, 2010]. En effet, à l'instar des études menées sur le sentiment de localisation, bien qu'il s'agisse d'une dimension de l'incarnation différente [Maselli et Slater, 2014], le point de vue utilisé dans l'environnement virtuel semble également impacter le sentiment de possession. Ainsi, la suite de notre revue de littérature est consacrée à la restitution des études portant sur la notion de point de vue et son impact sur l'expérience procurée à l'utilisateur en environnement virtuel immersif.

2.4 Point de vue en environnement virtuel

L'utilisation et le contrôle d'un avatar, ainsi que la conception générale d'un environnement virtuel, impliquent des choix quant au point de vue utilisé. Ce chapitre de notre état de l'art est ainsi dédié à la notion de point de vue. Celle-ci, bien qu'essentielle tant elle influe sur la perception qu'a un utilisateur de l'espace et du corps virtuel via lequel il évolue dans l'environnement simulé, n'a fait l'objet que de peu d'études dans le domaine de la réalité virtuelle. Bien que notre revue de littérature illustrera les investigations et travaux antérieurs portant sur la notion de point de vue, nous constaterons que rares sont les investigations recourant à des situations d'immersion et d'interaction complexes impliquant le contrôle d'un avatar via un procédé de synchronisation visuomotrice.

2.4.1 La notion de point de vue

Qu'il s'agisse de récit narratif, de jeu vidéo ou de réalité virtuelle dans notre contexte, le point de vue définit et caractérise la perception que le lecteur, le joueur ou l'utilisateur possède de l'histoire, des personnages, de l'environnement et des actions s'y déroulant. En littérature, il définit la focalisation du récit et se décline suivant trois points de vue narratifs. Il peut être omniscient, le lecteur dispose alors d'une connaissance absolue des personnages et de leurs actions, de leurs émotions, etc. Il peut également être interne, l'action est alors perçue au travers d'un personnage, ou externe, permettant une description de l'histoire et des événements empreints de neutralité et d'objectivité.

Concernant les environnements virtuels interactifs, la notion de point de vue a évolué avec le jeu vidéo, lui-même porté par les avancées technologiques et la progression de la puissance de calcul des consoles et ordinateurs. Ainsi, le passage de la 2D à la 3D a engendré de nouvelles considérations quant à la capacité de perception des environnements virtuels, induisant de nombreuses réflexions sur le processus de création et de conception (*game design*) des jeux vidéo. Certains théoriciens se sont penchés sur la question afin de proposer leurs réflexions quant à l'impact du point de vue sur la jouabilité⁷ (*gameplay*) des jeux vidéo [Rouse III, 1999; Taylor, 2002b]. Rouse III [1999] souligne l'importance de la phase réflexive concernant le choix d'un point de vue lors de l'élaboration d'un jeu, ce dernier impactant fortement l'expérience proposée aux joueurs. Bien que les études n'abondent pas sur cette notion, il existe une multitude de points de vue permettant différentes perceptions des environnements

7. Ensemble des possibilités interactives offertes par un jeu vidéo (convivialité, maniabilité, fluidité, etc.). (2018). Larousse, Éditions Larousse. [Larousse.fr](https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/jouabilité/186475). Récupéré le 28 août 2018, de <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/jouabilité/186475>

virtuels résultant de la position de la caméra au sein de ceux-ci. Les travaux de Taylor [2002b] présentent une revue étendue des points de vue utilisés par les studios de développement pour la production de jeux vidéo. De manière générale, six points de vue sont fréquemment exploités (Figure 2.5) :

- **Première personne** (*first-person*, Figure 2.5a) : démocratisé avec l'apparition du jeu *Doom*⁸ en 1993, le point de vue à la première personne permet au joueur de percevoir l'environnement virtuel à travers les yeux du personnage ou de l'entité contrôlée. Il s'agit d'une retranscription naturelle des mécanismes perceptifs de l'utilisateur se voulant similaire à la réalité. De nombreux jeux de tir ainsi que certains jeux de rôle et d'aventure proposent ce type de point de vue.
- **Troisième personne** (*third-person*, Figure 2.5b) : le point de vue à la troisième personne permet au joueur de voir évoluer son personnage au sein de l'environnement virtuel via une caméra située derrière celui-ci. Ce type de point de vue fut notamment observable et popularisé grâce à la série *Tomb Raider*⁹. Plusieurs déclinaisons sont observables parmi les nombreux jeux employant actuellement ce type de point de vue. Ainsi, si certains permettent une perception globale de l'avatar contrôlé, d'autres en revanche cantonnent le champ de vision à la perception du buste du personnage.
- **Vue de trois quarts** (*three-fourths view*, Figure 2.5c) : vue plongeante centrée sur le personnage ou l'entité contrôlée et suivant les déplacements de celui-ci. Ce type de point de vue est fréquemment utilisé pour les jeux de type *hack'n slash*¹⁰, à l'image de la série *Diablo*¹¹ ou certains jeux de rôles tels que *Divinity : Original Sin 2*¹².
- **Vue divine** (*god view*, Figure 2.5d) : vue de dessus permettant une perception globale de l'environnement et un déplacement libre de la caméra. De nombreux jeux de stratégie et de gestion tels que *StarCraft*¹³ ont recours à ce type de point de vue, ainsi que la plupart des MOBA (*Multiplayer Online Battle Arena*) à l'image de *DOTA 2*¹⁴.
- **Caméra fixe** (*fixed camera*, Figure 2.5e) : l'utilisation de la caméra fixe permet de contraindre le champ de vision du joueur à un espace donné dans lequel il peut observer le personnage évoluer. Ce type de point de vue fut notamment utilisé dans certains jeux d'horreur ou de survie tels que les trois premiers titres de la série *Resident Evil*¹⁵ pour renfoncer l'ambiance, le suspense et les effets de surprise.

8. *Doom*, id Software, 1993.

9. *Tomb Raider*, Eidos Interactive, 1996.

10. Jeux vidéo de rôle dont le *gameplay* se focalise sur le combat contre des hordes de monstres.

11. *Diablo*, Blizzard Entertainment, 1997.

12. *Divinity : Original Sin 2*, Larian Studios, 2017.

13. *StarCraft*, Blizzard Entertainment, 1998.

14. *DOTA 2*, Valve, 2013.

15. *Resident Evil*, Capcom, 1996.

- **Caméra 2D à défilement latéral** (*2D side-scrolling camera*, Figure 2.5f) : historiquement utilisé par les jeux vidéo en deux dimensions, le défilement latéral est employé depuis l'apparition des premières consoles avec des titres comme *Metroid*¹⁶ dont le premier opus est paru en 1986. Ce type de point de vue permet de percevoir le personnage ou l'entité contrôlée évoluer horizontalement ou verticalement dans un environnement plan. Ce type de jeu connaît aujourd'hui une recrudescence, notamment grâce à l'essor des jeux mobiles.



FIGURE 2.5 – Illustration de six points de vue employés pour le développement de contenu vidéoludique. Points de vue à la première (2.5a) et à la troisième personne (2.5b) du jeu *PlayerUnknown's Battlegrounds* (PUBG Corporation, 2017). Vue de trois quarts du *hack'n slash Diablo 3* (Blizzard Entertainment, 2012) (2.5c). Vue divine du jeu de stratégie et de gestion *StarCraft 2* (Blizzard Entertainment, 2010) (2.5d). Caméra fixe intégrée au mode caméra classique du jeu d'horreur *Resident Evil 4* (Capcom, 2005) (2.5e). Caméra 2D à défilement latéral du jeu de plateformes *Seasons After Fall* (Focus Home Interactive, 2016) (2.5f).

16. *Metroid*, Nintendo, 1986.

La centralité de la notion de point de vue et son impact sur la jouabilité ont par ailleurs engendré une catégorisation donnant naissance à des genres de jeux basés sur le type de point de vue utilisé. L'exemple actuel le plus explicite concerne les jeux de tir aujourd'hui qualifiés de jeu de tir à la première personne (*First-Person Shooter*, *FPS*, Figure 2.5a), induisant une perception égocentrée de l'environnement, ou de jeu de tir à la troisième personne (*Third-Person Shooter*, *TPS*, Figure 2.5b), la vision étant ici hétérocentrée et focalisée sur le personnage contrôlé.

Certaines études antérieures s'inscrivant dans le champ des sciences du jeu (*game studies*) ont comparé l'impact des points de vue à la première et à la troisième personne sur l'expérience procurée aux joueurs. Ces investigations ont recouru à des jeux offrant la possibilité d'évoluer dans l'environnement virtuel via ces deux points de vue afin d'en évaluer leurs implications sur la présence [Kallinen *et al.*, 2007], l'immersion [Denisova et Cairns, 2015] et l'impact psycho-physiologique [Lim et Reeves, 2009].

Les études de Kallinen *et al.* [2007] et de Denisova et Cairns [2015], basées respectivement sur les titres *Morrowind*¹⁷ et *Skyrim*¹⁸ de la série de jeux de rôle *The Elder Scrolls*, démontrent un impact positif du point de vue à la première personne sur le sentiment de présence et l'immersion des joueurs. Cependant, Denisova et Cairns [2015] soulignent le fait que le point de vue à la troisième personne facilite la navigation dans l'environnement virtuel. Les travaux de Lim et Reeves [2009], basés sur le jeu en ligne massivement multijoueur *World of Warcraft*¹⁹, ne révèle pas d'impact physiologique significatif sur le joueur. Cependant, le point de vue à la troisième personne accroît les effets liés au choix et à l'apparence des avatars sur le rythme cardiaque des joueurs, celui-ci permettant de percevoir l'intégralité du personnage sélectionné.

2.4.2 Périmètre des investigations : première et troisième personne en environnement immersif

Nous venons d'évoquer la multitude de possibilités concernant la notion de point de vue et son impact sur la jouabilité et l'expérience au travers du médium du jeu vidéo. Dans la cadre de nos recherches portant sur les environnements virtuels immersifs, nous limiterons le périmètre de notre étude à l'utilisation des points de vue à la première (Figure 2.5a) et à la troisième personne (Figure 2.5b). En effet, dans le cadre d'applications de réalité virtuelle,

17. *Morrowind*, Bethesda Softworks, 2002.

18. *Skyrim*, Bethesda Softworks, 2011.

19. *World of Warcraft*, Blizzard Entertainment, 2004.

en particulier dans les limites de notre sujet de thèse centré autour de la figure de l'avatar, ces points de vue semblent être les plus pertinents pour étudier la relation entre l'utilisateur et l'entité qu'il incarne dans l'environnement virtuel.

Le point de vue à la première personne permet une vision colocalisée entre l'utilisateur et l'avatar ou l'entité contrôlée dans l'environnement virtuel. En cela, il propose une vision incarnée simulant nos mécanismes perceptifs réels. À l'heure actuelle, ce point de vue est de loin le plus utilisé dans les systèmes de réalité virtuelle, ces derniers ayant majoritairement pour ambition de nous transposer *in situ* dans l'univers de synthèse. Ainsi, il permet une restitution naturelle de notre vision permettant de projeter l'utilisateur dans la « peau » du personnage contrôlé. En revanche, de nombreux dispositifs immersifs n'utilisent pas de modélisation d'avatar et proposent uniquement une restitution du point de vue simulant la position du regard. Afin de limiter le champ d'investigation de notre étude, nous prendrons donc le parti d'avoir recours à l'utilisation d'un avatar, indépendamment du point de vue utilisé dans les applications que nous serons amenés à mettre en œuvre dans le cadre de nos expérimentations.

Le point de vue à la troisième personne, quant à lui, permet de percevoir l'avatar depuis un point de vue externe autorisant l'observation et son évolution dans l'environnement virtuel. Nous sommes ici en mesure de cerner les actions, les mouvements et les déplacements effectués par le personnage via lequel nous agissons. Dans le contexte de nos investigations portant sur l'impact de la fidélité visuelle des avatars en environnement immersif, ce point de vue présente notamment l'avantage de permettre à l'utilisateur d'observer la morphologie de son avatar. Par ailleurs, il est à noter que ce point de vue peut présenter diverses variantes suivant la manière dont il est intégré par les développeurs. Ainsi, il peut permettre une restitution visuelle totale ou partielle du personnage, être centré ou non sur ce dernier, etc. Nous évoquerons ultérieurement la manière dont celui-ci est implémenté dans le cadre de nos études lors des chapitres restituant nos expérimentations (Chapitre 4, 6).

La suite de notre revue de littérature dédiée à la notion de point de vue se focalise dans un premier temps sur l'impact des différentes modalités considérées (première et troisième personne) en matière de perception, de spatialisation et de performance. Nous évoquerons, dans un second temps, les travaux antérieurs étudiant l'impact du point de vue sur le sentiment d'incarnation en environnement immersif.

2.4.3 Perception, spatialisation et interaction

Les théories et études s'inscrivant dans le champ des sciences du jeu évoquées préalablement s'accordent à dire que la restitution du point de vue à la troisième personne permettrait potentiellement à l'utilisateur de mieux se spatialiser en observant l'environnement virtuel dans lequel évolue l'avatar contrôlé [Rouse III, 1999; Taylor, 2002b]. Ces propos semblent par ailleurs se vérifier dans l'étude proposée par Denisova et Cairns [2015]. Une bonne spatialisation est un prérequis essentiel afin de permettre une navigation optimale dans un environnement simulé. Dans le champ de la réalité virtuelle, l'étude de Salamin *et al.* [2006] souligne l'importance de la perception des distances en vue d'obtenir une navigation et des interactions cohérentes avec l'environnement. Nous touchons ici aux concepts fondamentaux de la réalité virtuelle résidant dans l'immersion et l'interaction [Fuchs *et al.*, 2006]. En effet, il est difficilement concevable d'imaginer qu'une interaction puisse être efficace si l'utilisateur n'est pas en mesure d'interagir avec un élément de l'environnement à cause d'un défaut de perception, induisant dès lors la répétition du geste et donc nécessairement une altération de la qualité de l'expérience proposée.

Les recherches dans le champ de la réalité virtuelle démontrent une sous-estimation récurrente des distances perçues par les utilisateurs équipés d'un casque immersif. De nombreuses études ont investigué les facteurs pouvant potentiellement impacter cette perception (se référer aux travaux de [Renner *et al.*, 2013] pour une revue exhaustive). Si nombre de ces facteurs s'avèrent faiblement impactants, tels que le champ de vision [Knapp et Loomis, 2004], la qualité des graphismes [Thompson *et al.*, 2004] ou les propriétés mécaniques du casque [Willemsen *et al.*, 2004], d'autres sont en revanche beaucoup plus significatifs, tels que la stéréoscopie [Leroy, 2009], la présence d'ombres et de réflexions [Hu *et al.*, 2002] ou encore la présence d'un avatar [Mohler *et al.*, 2008, 2010]. Les travaux de Mohler *et al.* [2008, 2010] confortent ici notre positionnement concernant l'utilisation d'avatars afin de favoriser l'exactitude des distances perçues dans le cadre de nos expérimentations, et ce indépendamment du point de vue utilisé. Par ailleurs, il est également à noter que l'évolution des casques immersifs permet de réduire ce phénomène de sous-estimation, tel que le démontre Creem-Regehr *et al.* [2015], sans toutefois palier entièrement au problème. Bien que l'évolution de la technologie et l'utilisation d'avatar permettent de minimiser la sous-estimation des distances, certaines études proposent non pas d'identifier la ou les sources générant ce problème, mais d'instaurer des solutions palliatives. Ainsi, en vue de permettre à l'utilisateur de s'accommoder aux distances perçues, les travaux de Kelly *et al.* [2014] recommandent l'intégration d'une phase d'adaptation à la navigation permettant une nette réduction du défaut de perception.

Nous venons de souligner l'importance de la perception des distances afin d'octroyer la possibilité aux utilisateurs d'interagir et de naviguer de manière cohérente. Cependant, seules quelques études se sont penchées sur la capacité d'interaction d'un utilisateur en environnement virtuel immersif au regard de différentes modalités de point de vue [Boulic *et al.*, 2009; Covaci *et al.*, 2014; Debarba *et al.*, 2015; Salamin *et al.*, 2006] malgré les potentialités et cas d'usages afférents à l'implémentation de modalités alternatives. Pragmatiquement, ce constat peut s'expliquer par les aspects matériels et conceptuels suivants :

- Premièrement, l'étude des points de vue et de leurs impacts sur les interactions nécessite des prérequis matériels. En effet, si le point de vue à la première personne peut se dispenser d'avatar, ce n'est pas le cas de celui à la troisième personne. L'objectif dans cette condition étant que l'utilisateur puisse s'observer en train d'agir via un corps virtuel évoluant de manière synchrone avec son corps réel. Ainsi le matériel et l'infrastructure nécessaires à la mise en place du contrôle d'un avatar impliquent le recours à des technologies de capture de mouvement en temps réel jusqu'alors onéreuses et peu répandues. Ce type de technologie permet de reproduire fidèlement les mouvements de l'utilisateur vers son avatar, afin que ce dernier puisse interagir et évoluer au sein de l'environnement virtuel. Cependant, l'évolution actuelle et la démocratisation du marché de la réalité virtuelle favorisent l'apparition de capteurs inertiels et optiques abordables, quand il fallait par le passé disposer d'installations nécessitant des investissements s'élevant à plusieurs dizaines de milliers d'euros. De tels investissements ayant, a fortiori, restreint l'applicabilité des recherches aux quelques laboratoires et entreprises disposant de ce type d'infrastructure.
- Deuxièmement, un des objectifs premiers de la réalité virtuelle réside, par définition, dans la transposition de la réalité au sein d'un environnement immersif simulé par ordinateur. Or, partant de ce principe, il ne fut pas initialement envisagé de restituer la vision autrement que par la tentative de reproduction de nos mécanismes perceptifs naturels. La retranscription du point de vue à la première personne s'est donc ainsi imposée via une forme de consentement tacite de la communauté de développeurs d'applications immersives. Nous pensons en revanche que tout l'intérêt de la réalité virtuelle réside dans son potentiel à nous faire vivre des expériences extraordinaires (au sens littéral du terme), c'est-à-dire des expériences ne pouvant être vécues dans la vie réelle. Ainsi, la portée de nos travaux dépasse la simple analyse de l'impact des différents points de vue en environnement immersif en invitant à considérer de nouveaux cas d'usages potentiels propres au médium de la réalité virtuelle.

L'étude de Salamin *et al.* [2006] fait un premier pas vers l'évaluation des bénéfices liés à l'utilisation du point de vue à la troisième personne, bien qu'on ne puisse pas à proprement parler ici de réalité virtuelle, l'expérimentation se basant sur une transposition du point de vue réel de l'utilisateur. L'étude proposée ici recourt à un visio-casque affichant le flux vidéo d'une caméra située derrière l'utilisateur. Cette expérimentation a mis en avant de nombreux aspects déterminants qui, comme le soulignent les auteurs, mériteraient d'être testés en environnement virtuel afin de vérifier la transposabilité de ces constatations. Le tableau 2.4 présente la synthèse de ces constats et répertorie les situations propices à l'utilisation des points de vue étudiés.

TABLEAU 2.4 – Synthèse des résultats de l'expérimentation de Salamin *et al.* [2006] présentant les points de vue favorables à chacune des situations évaluées (première (1P) et troisième personne (3P))

Critère d'évaluation	1P	3P
Temps d'effectuation moyen des tâches	X	
Perception des distances		X
Spatialisation et navigation		X
Interactions de précision	X	
Interactions en vue plongeante	X	
Interactions avec objets immobiles	X	
Interactions avec objets mobiles		X

À l'issue de cette première étude, il fut mené deux expérimentations sur la base des observations réalisées [Salamin *et al.*, 2010, 2008] dont les résultats confirment ceux initialement obtenus. Il est ainsi démontré que, malgré les problèmes liés à l'occultation générée par la présence du corps à l'écran lors du recours au point de vue à la troisième personne, les utilisateurs se montrent rapidement aussi, voire plus performants lors de l'effectuation d'une tâche qu'avec un point de vue à la première personne.

Les études présentées ont donc mis en relief la pertinence de l'utilisation des différents points de vue en fonction de la situation et de l'interaction proposée. En revanche, ces recherches ont été effectuées à l'aide d'un appareillage vidéo (caméra, visio-casque, etc.). Debarba *et al.* [2015] proposent une transposition partielle de ces analyses en environnement immersif grâce à un appareillage de réalité virtuelle. À l'aide d'un système de capture de mouvement et d'un casque immersif, l'étude permet d'évaluer la performance d'un utilisateur lors d'interactions avec des objets statiques en fonction du point de vue utilisé. Il est à

noter que dans cette expérimentation, le point de vue à la troisième personne repose sur l'intégration d'une caméra virtuelle statique limitant dès lors les usages potentiels. Les résultats démontrent néanmoins que, bien que moins précis dans l'atteinte des objets, les participants ont plus de facilités à détecter les éléments situés en périphérie du champ visuel à la troisième personne. Ces observations corroborent ainsi les théories et études précédentes portant sur la spatialisation et la perception de l'environnement.

2.4.4 Point de vue et sentiment d'incarnation

Au regard de notre revue de littérature, les différentes modalités de point de vue semblent affecter la capacité de perception, de spatialisation et d'interaction des utilisateurs. Nous allons à présent nous focaliser sur l'impact de ces modalités sur le sentiment d'incarnation, notion prépondérante de l'expérience utilisateur en environnement immersif et centrale dans le cadre de notre recherche.

Nous avons évoqué, lors de la présentation des travaux portant sur le sentiment d'incarnation, l'impact de différents facteurs pouvant affecter l'émergence des trois dimensions constitutives de ce sentiment en environnement virtuel : la localisation de soi, le sentiment d'agentivité et le sentiment de possession [Kiltene *et al.*, 2012] (consulter la section 2.3.4 dédié au sentiment d'incarnation pour une revue étendue de ces concepts). Ainsi, parmi ces facteurs, nous retrouvons notamment les stimulations multisensorielles telles que les synchronisations visuomotrice et visuotactile, les caractéristiques morphologiques des entités contrôlées, la notion de point de vue, etc. L'analyse et la confrontation des résultats observés dans les études antérieures portant sur l'impact du point de vue sur le sentiment d'incarnation révèlent des divergences, notamment en ce qui concerne la localisation de soi et le sentiment de possession [Debarba *et al.*, 2017, 2015; Maselli et Slater, 2013; Petkova et Ehrsson, 2008; Petkova *et al.*, 2011; Slater *et al.*, 2010]. Bien que ces deux dimensions semblent pouvoir être affectées par des facteurs similaires, l'étude de Maselli et Slater [2014] démontre néanmoins qu'il s'agit de dimensions distinctes pouvant être altérées de manière indépendante.

Concernant la localisation, certains travaux démontrent que le point de vue à la première personne favorise le sentiment d'être localisé dans le corps factice ou virtuel [Maselli et Slater, 2013, 2014]. Intuitivement, ce constat semble logique de par la position de la caméra induisant une reconduction congruente entre le regard de l'utilisateur et celui de son avatar. Ainsi, ces études soulignent que le point de vue à la troisième personne ne peut pas, à lui seul, donner l'illusion d'être localisé dans un corps virtuel distant. Cependant, les travaux de Blanke et Metzinger [2009]; Ehrsson [2007]; Lenggenhager *et al.* [2009, 2007] démontrent la possibilité

d'induire un décalage de perception via des stimulations visuotactiles synchrones (Chapitre 2.3.4). De plus, l'étude de Debarba *et al.* [2015] démontre qu'il est également possible d'induire un conflit de localisation chez les utilisateurs sous des conditions de synchronisation visuomotrice. Néanmoins, une seconde étude menée par la même équipe tend à contredire ces observations [Debarba *et al.*, 2017], les résultats démontrent la prévalence du point de vue à la première personne pour l'induction d'un sentiment de localisation dans le corps virtuel contrôlé.

À l'instar des études menées sur le sentiment de localisation, l'impact du point de vue sur le sentiment de possession est également sujet à controverse. Les études de Slater *et al.* [2010] et Maselli et Slater [2013] démontrent la prédominance du point de vue à la première personne dans l'émergence du sentiment de possession d'un corps virtuel. Cependant, le point de vue à la troisième personne n'est pas ici centré sur les personnages virtuels, mais décalés latéralement, les avatars n'étant ainsi observables qu'en orientant le regard dans leur direction. Il est également à noter que, bien que ces études analysent l'impact des stimulations multisensorielles visuotactiles et visuomotrices, le contrôle du corps virtuel s'avère relativement limité (rotation synchrone de la tête). Si une telle implémentation permet de mener des études dans un contexte expérimental, elle ne peut que difficilement présenter un cas d'usage potentiel, limitant dès lors l'applicabilité des résultats observés. Ainsi, les analyses menées dans le cadre des études de Debarba *et al.* [2017, 2015] contrastent avec les observations antérieures de Slater *et al.* [2010] et Maselli et Slater [2013]. En effet, les résultats de ces recherches n'ont pas permis d'identifier de différences significatives sur le sentiment de possession du corps d'un avatar en fonction des différentes modalités de point de vue (première et troisième personne). Debarba *et al.* [2015] avancent plusieurs hypothèses pour expliquer de telles observations. Premièrement, la mobilisation physique active induite par la tâche diffère des paradigmes des études antérieures. Dans ces conditions, la charge cognitive et l'implication requises maximiseraient l'engagement des participants, facilitant ainsi indirectement le transfert vers l'entité contrôlée. Deuxièmement, l'intégration multisensorielle liée à la synchronisation visuomotrice serait un vecteur favorisant l'émergence et le maintien du sentiment de possession d'un avatar virtuel sous différentes conditions de point de vue.

Nous constatons donc que les résultats des recherches portant sur la notion de point de vue divergent quant à l'impact de celui-ci sur les différentes dimensions constitutives du sentiment d'incarnation. C'est pourquoi nous avons mené, dans le cadre de notre première année de recherche, une expérimentation dédiée à l'investigation de cet aspect central dans le cadre de nos études (Chapitre 4). En effet, évaluer l'impact de la fidélité visuelle des avatars

sur le sentiment d'incarnation, ainsi que sur les implications comportementales associées, implique de permettre à l'utilisateur d'observer l'apparence de son personnage. Ce faisant, il fut envisageable d'avoir recours à la reconduction du point de vue à la première personne et à l'ajout de surfaces réfléchissantes (miroirs virtuels, eau, etc.), ou bien à l'implémentation d'un point de vue à la troisième personne permettant une perception globale de l'avatar contrôlé. Il nous est donc apparu nécessaire d'éclairer les apports potentiels de ces modalités de point de vue en environnement immersif préalablement aux investigations portant sur l'impact de la fidélité visuelle des avatars, notion que nous allons à présent aborder dans la prochaine partie de ce chapitre.

2.5 Apparence et fidélité des avatars

Au travers des différents chapitres préalables notre état de l'art, nous venons de définir le concept d'avatar et restituer les études portant sur la notion d'expérience utilisateur. Nous avons dès lors détaillé les dimensions centrales de nos investigations, telles que les sentiments de présence et d'incarnation en environnement immersif, ainsi que les facteurs en favorisant l'émergence et le maintien. L'intégration de ces notions est par ailleurs nécessaire à la compréhension de ce dernier chapitre de notre état de l'art se situant à la croisée des éléments présentés préalablement. Ce chapitre s'avère ainsi dédié à l'impact de l'apparence des avatars incarnés, notamment de leur niveau de fidélité visuelle, sur le comportement des utilisateurs.

2.5.1 Fidélité visuelle et comportementale

La fidélité des avatars peut être catégorisée en deux dimensions : la fidélité visuelle et la fidélité comportementale. Les travaux de Garau [2003] investiguent ces deux aspects de la fidélité ainsi que les contraintes régissant l'équilibre entre ces notions. La fidélité visuelle concerne les propriétés liées à l'apparence de l'avatar. Si les évolutions techniques et l'amélioration croissante de la puissance de calcul des ordinateurs permettent aujourd'hui d'atteindre des rendus temps réel présentant un niveau de réalisme extrêmement élevé (Figure 2.6) [Seymour *et al.*, 2017a], il n'en demeure pas moins que l'aspect visuel des avatars et des éléments constitutifs des environnements virtuels reste limité par les performances matérielles.



FIGURE 2.6 – Démonstration technique de la librairie FaceWorks © NVIDIA Corporation 2018.

Cependant, même si de nombreuses applications prétendent à un réalisme croissant, la recherche de celui-ci n'est pas forcément nécessaire à la production de contenu de qualité [Wages *et al.*, 2004]. En effet, de nombreux studios de développement produisent des applications et jeux vidéo aux directions artistiques non réalistes assumées et particulièrement efficaces, bien que ce jugement reste subjectif et à l'appréciation de chacun. L'essentiel est de garantir la cohérence visuelle et la plausibilité des événements dans l'univers proposé [Slater, 2009]. D'après les travaux de Garau [2003] et Mansour *et al.* [2006], la fidélité visuelle d'un avatar peut être qualifiée suivant trois critères :

- **Anthropomorphisme** (*non-humanoïde <-> humanoïde*).
- **Réalisme** (*stylisé <-> photoréaliste*).
- **Véracité** (*ne ressemble pas à l'utilisateur <-> ressemble à l'utilisateur*).

La fidélité comportementale concerne quant à elle les propriétés dynamiques de l'avatar, notamment l'animation corporelle et les expressions faciales. Ces animations sont des composantes essentielles de la communication non verbale permettant à l'utilisateur de s'exprimer via le langage corporel. Ces potentiels d'interactions sont notamment intéressants en situation de co-présence afin de favoriser la transmission d'émotions et de comportements sociaux (empathie, sympathie, etc.). Les recherches de Garau [2003] soulignent la charge cognitive pouvant résulter du contrôle des comportements des avatars en fonction des dispositifs d'interaction utilisés. Ainsi, les interfaces naturelles, telles que les dispositifs de capture de mouvement, permettent d'induire un haut niveau de fidélité comportementale via la synchronisation des mouvements de l'utilisateur et de son avatar. Ce procédé impacte ainsi les niveaux d'immersion perceptuelle [Cummings et Bailenson, 2016], de présence [Usoh *et al.*, 1999] et favorise le processus d'incarnation, notamment en affectant les sentiments de possession et d'agentivité [Debarba *et al.*, 2015; Latoschik *et al.*, 2016; Slater *et al.*, 2009b].

Bien que ces deux aspects de la fidélité des avatars peuvent drastiquement impacter l'expérience procurée aux utilisateurs d'environnements immersifs, les investigations menées dans le cadre de nos recherches portent essentiellement sur l'impact de la fidélité visuelle. Le niveau de fidélité comportementale s'avère constant dans l'ensemble de nos expérimentations. Ainsi, nos études impliquant le contrôle d'avatars en temps réel recourent à des systèmes de capture de mouvement permettant une synchronisation visuomotrice intégrale. La suite de ce chapitre est donc dédiée à la présentation des trois critères de la fidélité visuelle afin de définir avec précision l'objet de nos investigations.

Anthropomorphisme

L'étymologie du terme anthropomorphisme provient du grec ancien. Elle dérive de l'association d' « *ánthrôpos* », « être humain », et de *morphé*, « forme ». Ainsi, le concept d'anthropomorphisme réfère à l'attribution de caractéristiques comportementales ou morphologiques humaines à différentes entités animales, divines, etc.

Dans notre contexte, le niveau d'anthropomorphisme correspond aux caractéristiques morphologiques de l'avatar. Ce premier des trois critères de la fidélité visuelle permet ainsi de qualifier les personnages virtuels en fonction de leur niveau de similitude avec un schéma humanoïde. Par ailleurs, la théorie du dilemme du Cyborg de Biocca [1997] souligne l'influence potentielle de la morphologie de l'avatar, ainsi que les altérations possibles de la perception que les utilisateurs ont de leur corps :

Choisissez l'incarnation technologique pour amplifier le corps, mais prenez garde à ce que votre schéma corporel et votre identité puissent s'adapter à cette forme de cyborg. [Traduction].

Ainsi, les incohérences morphologiques des avatars conduiraient à une distorsion du modèle mental des utilisateurs, ces derniers adaptant en retour leur schéma corporel à celui de l'avatar contrôlé. De récentes études à ce sujet démontrent la capacité d'adaptation du cerveau humain. Ainsi, le concept d'*homuncular flexibility* [Won *et al.*, 2015] illustre cette capacité à contrôler des membres supplémentaires ou anormaux, tels qu'une queue [Steptoe *et al.*, 2013], un sixième doigt [Hoyet *et al.*, 2016], ou encore un troisième bras [Laha *et al.*, 2016]. L'étude de Steptoe *et al.* [2013] démontre notamment qu'il est possible d'éprouver un sentiment de possession et d'agentivité envers des entités n'appartenant pas au schéma corporel humanoïde. L'induction de ces sentiments nécessite cependant un contrôle en temps réel de ce membre virtuel via des métaphores d'interaction synchrones basées sur les mouvements de l'utilisateur.

Dans le cadre de nos recherches, nous utilisons des avatars humanoïdes contrôlés en temps réel grâce à différents systèmes de capture de mouvement. En effet, la synchronisation visuo-motrice congruente implique un schéma corporel similaire entre les utilisateurs et les avatars afin de permettre un transfert naturel de nos mécanismes de navigation et d'interaction.

Réalisme

Le niveau de réalisme perceptuel [McMahan, 2003] d'un modèle 3D est défini par la densité du maillage, le type de *shader*²⁰ et les textures (Figure 2.7). Comme nous l'évoquons en introduction de cette section, le niveau de réalisme s'avère principalement limité par des contraintes matérielles liées à la puissance de calcul nécessaire au rendu 3D temps réel. Ainsi, le traitement de *shaders* permettant un rendu physique réaliste (*PBR*²¹) (Figure 2.7b) nécessitera généralement plus de ressources que le recours à des techniques de *toon-shading* (Figure 2.7a) ou de *cel-shading*²².



(a) Rendu stylisé (*Toon-shading*)

(b) Rendu réaliste (*PBR shader*)

FIGURE 2.7 – Illustration de deux niveaux de réalisme induits par la variation des *shaders* et des textures du personnage Adam issu du court métrage temps réel éponyme développé par Unity Technologies. Le modèle de la figure 2.7b comporte l'ensemble des textures originales du personnage ainsi qu'un *shader* au rendu physique réaliste (*PBR*). Le modèle de la figure 2.7a n'utilise que la texture comportant les informations colorimétriques et un *shader* de rendu stylisé (*toon-shading*) © Unity Technologies ApS 2016.

Les études de Zell *et al.* [2015] et de Fleming *et al.* [2017] semblent démontrer que le réalisme ne constitue pas un bon prédicateur de l'attractivité des personnages virtuels. Les travaux de Zell *et al.* [2015] illustrent notamment l'importance de la cohérence entre le niveau de stylisation des formes et des matériaux des personnages, les incohérences ayant un impact

20. Un *shader* ou nuanceur est un programme informatique, utilisé en imagerie de synthèse, pour paramétrer une partie du processus de rendu réalisé par une carte graphique ou un moteur de rendu logiciel. Il sert à décrire l'absorption et la diffusion de la lumière, la texture à utiliser, les réflexions et réfractions, l'ombrage, le déplacement de primitives et des effets post-traitement.

21. Le rendu physique réaliste, ou *PBR* (*Physically Based Rendering*), est un modèle d'illumination permettant la création de rendus 3D respectant les lois de la physique.

22. Le *cel-shading*, ou *toon-shading*, est un type de rendu non photoréaliste conçu pour donner l'impression que l'infographie 3D est plate en utilisant moins de nuances et de dégradés de couleurs et d'ombrage. Le *cel-shading* est souvent utilisé pour imiter le style d'une bande dessinée ou d'un dessin animé et/ou pour lui donner une texture caractéristique semblable à celle du papier. Le nom provient de *cells* (abréviation de *celluloid*), feuilles transparentes d'acétate peintes pour être utilisées en animation 2D traditionnelle.

négalif sur l'attractivité des modèles. Les travaux de Fleming *et al.* [2017] révèlent également l'influence significative des formes et les proportions sur l'évaluation de l'attractivité des personnages virtuels. Les résultats démontrent notamment que ces évaluations s'avèrent plus favorables pour des avatars présentant un niveau de stylisation intermédiaire (estimé à environ 33 %) par rapport aux modèles originaux issus de reconstruction 3D.

Concernant les interactions sociales, la confrontation à un agent autonome réaliste faciliterait l'émergence de comportements sociaux, tels que la timidité ou la honte, en favorisant la perception de la personnalité et des caractéristiques sociales des interlocuteurs virtuels [Volante *et al.*, 2016]. Cependant, le haut niveau de réalisme perceptuel d'un avatar ou d'un agent induit un horizon d'attente élevé pour l'utilisateur, celui-ci étant plus enclin à détecter les incohérences entre le niveau de réalisme visuel et comportemental du personnage. En d'autres termes, plus le niveau de réalisme s'avérera élevé, et donc proche de la réalité, plus les incohérences empêcheront l'induction chez l'utilisateur d'une suspension consentie de l'incrédulité. Ce phénomène consiste à accepter l'univers fictif proposé en inhibant temporairement son jugement vis-à-vis de la vraisemblance de la situation. Nous reviendrons ultérieurement sur cette notion de cohérence de laquelle dépend la crédibilité et l'acceptation des avatars dans la section 2.5.2 de ce chapitre.

Si le niveau de réalisme perceptuel semble influencer l'expérience subjective des utilisateurs, il semble également pouvoir impacter les performances et notamment l'efficacité des interactions en environnement immersif. À titre d'exemple, les travaux de Argelaguet *et al.* [2016] démontrent que le contrôle d'une main virtuelle abstraite (variation du niveau d'anthropomorphisme et de réalisme) peut permettre l'induction d'un sentiment d'agentivité plus élevé qu'une main réaliste en optimisant la vitesse et la précision des interactions, et ce bien qu'il faille considérer la robustesse du matériel et du tracking utilisé dans le cadre de cette expérimentation. Par ailleurs, il semble possible d'éprouver un sentiment de possession envers une main virtuelle présentant différents niveaux de réalisme dès lors que la morphologie s'avère suffisamment congruente avec celle d'une main réelle [Argelaguet *et al.*, 2016; Lin et Jörg, 2016].

À l'image de l'anthropomorphisme, le niveau de réalisme s'avère constant dans l'ensemble de nos expérimentations. Chaque avatar présente une densité de maillage similaire et à recours à des *shaders PBR* induisant un rendu des modèles physiquement réaliste.

Véracité

La véracité, troisième critère de la fidélité visuelle, correspond au degré de similitude entre l'apparence de l'utilisateur et celle de l'avatar [Benford *et al.*, 1995, 1997; Garau, 2003]. Ce critère est impacté à la fois par la correspondance du maillage et des textures du modèle 3D. Ainsi, un haut niveau de véracité implique nécessairement des niveaux d'anthropomorphisme et de réalisme perceptuel importants. Cette dimension de la fidélité visuelle constitue le cœur de nos expérimentations intégrant des avatars issus de reconstructions 3D, ce procédé de modélisation permettant théoriquement d'atteindre le plus haut niveau de véracité.

Des recherches antérieures sur les doppelgängers²³ permettent d'observer les effets de la confrontation d'utilisateurs à leur propre représentation sous la forme d'agents virtuels autonomes [Bailenson et Segovia, 2010]. Il est ainsi démontré que les participants s'affranchissent de certaines normes sociales, notamment en matière de proxémie, en ne respectant pas les distances interpersonnelles d'usage lorsque ces derniers sont immergés face à leur propre représentation [Bailenson *et al.*, 2001, 2008]. En effet, il semble qu'une version virtuelle de soi puisse être analysée et perçue par le cerveau d'une manière similaire au soi réel [Gonzalez-Franco *et al.*, 2016]. Des études ont ainsi révélé différents intérêts potentiels liés à l'observation de notre double virtuel, tels qu'une plus grande implication dans des tâches sportives après un renforcement indirect virtuel [Fox et Bailenson, 2009] ou une préparation à la prise de parole en public [Aymerich-Franch et Bailenson, 2014].

Les travaux de Lucas *et al.* [2016] portant sur les jeux vidéo et les travaux de Waltemate *et al.* [2018] sur les environnements immersifs semblent respectivement démontrer un engagement et un sentiment de possession accrus avec une représentation virtuelle de soi. Cependant, bien que les utilisateurs manifestent un intérêt envers leur représentation 3D [Park, 2018], on sait néanmoins peu de choses sur l'impact du contrôle en temps réel de notre double virtuel. C'est pourquoi nos investigations ambitionnent d'étudier l'impact de la véracité sur le sentiment d'incarnation et sur le comportement des utilisateurs. Dans le cadre de nos recherches, les conditions expérimentales se basant sur des reconstructions 3D se limitent à l'intégration de la tête des utilisateurs et à l'adaptation de la taille du corps des avatars. Outre les contraintes techniques, il s'avère que les aspects les plus significatifs de l'identité d'une personne sont perçus sur le visage [Bailenson *et al.*, 2004, 2008; Bull et Rumsey, 1988]. De plus, limiter la reconstruction à la tête de l'utilisateur permet d'intégrer un corps virtuel cohérent avec l'environnement virtuel proposé.

23. D'origine germanique, le terme *doppelgänger* signifie sosie ou double d'une personne vivante. Il fait référence à la dualité de l'être humain.

2.5.2 Cohérence visuelle et comportementale : la « vallée dérangement »

Nous venons d'évoquer au travers de la section précédente la notion de fidélité des avatars. À cette occasion, nous avons présenté les deux dimensions composant cette notion : la fidélité visuelle et la fidélité comportementale. Si nos investigations portent sur l'impact de la fidélité visuelle, notamment sur le critère de véracité (similarité entre l'utilisateur et son avatar), nous avons néanmoins évoqué à plusieurs reprises l'importance de la cohérence. La cohérence est un aspect fondamental du processus d'acceptation des avatars et intervient à deux niveaux que nous qualifierons d'intrinsèque et d'extrinsèque :

- **La cohérence extrinsèque** concerne la relation entre l'avatar et l'environnement virtuel. Afin de garantir la plausibilité de la présence d'un avatar au sein d'un univers fictif, il est nécessaire d'en assurer la cohérence visuelle. Pour permettre l'acceptation d'un modèle, celui-ci ne doit pas nécessairement se vouloir réaliste et donc se baser sur des référentiels réels pour l'utilisateur. Il doit cependant apparaître en adéquation avec l'ensemble des éléments visuels constituant l'environnement. À titre d'exemple, un avatar humain intégré dans un univers contemporain sera plus facilement acceptable par l'utilisateur qu'un robot dans ce même environnement, aucun élément n'en légitimant sa présence. Par ailleurs, il est à noter que notre imaginaire collectif s'avère largement impacté par notre culture, aussi les œuvres de fiction littéraires, cinématographiques ou vidéoludiques influencent significativement notre potentiel d'acceptation d'univers alternatifs. Nos études impliquant le contrôle d'avatars de différentes natures, une attention particulière est portée à la cohérence de chaque personnage avec les environnements virtuels proposés lors de la conception et du développement des applications dédiées aux expérimentations.
- **La cohérence intrinsèque** concerne quant à elle l'adéquation entre l'apparence et le comportement des personnages virtuels. En d'autres termes, il est primordial de proposer des niveaux de réalisme visuel et comportemental cohérents pour assurer la crédibilité des avatars et agents. En effet, chaque personnage se doit d'adopter des attitudes appropriées à son niveau de représentation, sous peine d'induire un rejet de la part des utilisateurs. De plus, si le niveau de réalisme d'un modèle peut influencer sur son potentiel d'acceptation, l'affinité d'un utilisateur envers celui-ci peut également se voir amplifiée par la cohérence de son comportement, un phénomène connu sous le nom de « vallée dérangement » (« *uncanny valley* ») [Mori, 1970; Mori *et al.*, 2012]. Ainsi, nous allons introduire et analyser cette théorie dans la suite de ce chapitre afin d'en considérer l'impact, potentiellement majeur, dans le cadre de nos recherches.

La théorie de la vallée dérangeante émerge en 1970 quand le roboticien japonais Masahiro Mori publie dans une revue alors intitulée *Energy* un article introduisant le concept d'« *uncanny valley* » [Mori, 1970; Mori *et al.*, 2012]. Il s'agit d'une théorie selon laquelle l'apparence et le comportement d'une entité (robot, prothèse, etc.) moduleraient notre potentiel d'acceptation ou de rejet envers celle-ci. Ce phénomène fut intitulé ainsi en référence à la courbe proposée par l'auteur présentant une forte déclinaison en son centre (Figure 2.8). L'observation de cette courbe illustre l'impact de l'aspect visuel, et notamment de la similarité d'une entité avec l'être humain, sur son potentiel d'acceptation. Plus cette entité tendra à s'approcher d'une apparence humaine sans vraiment l'atteindre, plus elle s'exposera au risque de se voir rejeter à cause de ses imperfections, cette dernière procurant une sensation étrange et dérangeante. Ainsi, cette théorie suggère que la réaction d'une personne confrontée à un robot, ou par extension à un personnage virtuel, pourrait spontanément passer de l'empathie à la répulsion. Ce phénomène s'avère par ailleurs amplifié par l'animation et la cohérence comportementale de cette entité.

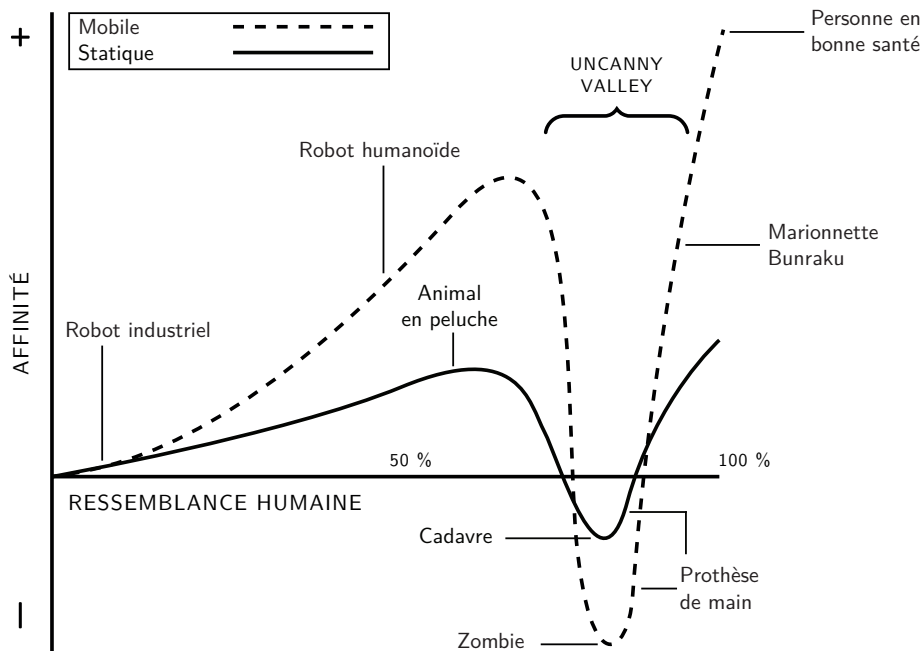


FIGURE 2.8 – Courbe de la théorie de la vallée dérangeante [Mori, 1970; Mori *et al.*, 2012] illustrant la variation du potentiel d'acceptation d'une entité en fonction de sa ressemblance avec l'être humain. Une amplification du phénomène est observable pour les entités animées.

Pour illustrer le propos de cette théorie initialement inscrite dans le champ de la robotique, considérons le cas d'un robot industriel destiné à la production sur chaîne. Bien qu'il ne présente pas de caractéristiques anthropomorphiques, il ne suscite néanmoins aucune réaction de rejet, car nous sommes en mesure d'identifier explicitement sa condition robotique. De plus, son comportement étant en adéquation et donc cohérent avec son apparence, nous sommes en mesure de l'accepter pour ce qu'il est : un robot industriel ne suscitant pas

de familiarité particulière. Prenons maintenant l'exemple d'un robot anthropomorphe, ou androïde, présentant un niveau de ressemblance proche de l'être humain. Ce dernier, bien que présentant de nombreuses similitudes sur un plan visuel, ne sera pas en mesure d'adopter un comportement cohérent avec son niveau de représentation. En effet, à l'heure actuelle et malgré l'évolution constante des technologies de la robotique humanoïde, il n'est pas encore possible de répliquer une dynamique fluide des mouvements humains. Il n'est pas non plus facile d'intégrer des comportements sociaux fondamentaux, tels que le contact visuel avec un interlocuteur. Ainsi, d'après la théorie de Mori *et al.* [2012], nous serions plus enclins à rejeter une telle entité de par l'inconfortable sensation d'étrangeté s'en dégageant liée à l'incohérence de son apparence et de son comportement.

La théorie de la vallée dérangement s'appliquant à diverses entités humanoïdes, elle s'avère par extension observable dans de nombreuses situations : prothèses médicales, mannequins, films d'animation, jeux vidéo (Figure 2.9), etc. Ainsi, l'étude de Seyama et Nagayama [2007] confronte les participants à des visages humains artificiels avec pour objectif l'identification de critères morphologiques faciaux discriminants. Les conclusions de l'étude tendent à confirmer la théorie et soulignent que le phénomène se manifesterait en présence d'incohérences morphologiques sur les visages les plus réalistes par rapport aux normes de constitution (écartement inter-pupillaire et dimension des yeux). Des résultats similaires sont également observés dans les études ultérieures de Green *et al.* [2008] et MacDorman *et al.* [2009]. Ces travaux portant sur la perception de personnages virtuels mettent en évidence différents facteurs influençant la perception et l'attrait généré par des modèles 3D tels que les textures, les ombres ou les formes et proportions [Zell *et al.*, 2015].

D'autre part, si ces études révèlent l'occurrence potentielle du phénomène de la vallée dérangement sur des personnages virtuels statiques, certains travaux démontrent l'amplification du potentiel d'acceptation ou de répulsion lié à l'animation de personnages virtuels [McDonnell *et al.*, 2012]. Bien que nous soyons aujourd'hui capables d'utiliser un système de capture de mouvement pour contrôler le corps de personnages virtuels en temps réel, les travaux de Latoschik *et al.* [2016] soulignent également l'importance des animations faciales. Néanmoins, les systèmes de réalité virtuelle immersifs actuels reposant sur l'utilisation de casques ne permettent pas de capturer les mouvements faciaux. L'implémentation de ce type de technologies devra faire l'objet d'investigations dans un futur proche afin de développer de nouvelles méthodes d'interaction non verbales, notamment dans le cadre d'études portant sur des cas d'usage multi-utilisateurs. Nous reviendrons par ailleurs sur ce point lorsque nous évoquerons les perspectives de nos travaux de recherche.



(a) Mass Effect : Andromeda

(b) Hellblade

FIGURE 2.9 – Captures d’écran de personnages issus des jeux vidéo Mass Effect : Andromeda © 2017 Electronic Arts Inc (Figure 2.9a) et Hellblade © 2017 Ninja Theory Ltd (Figure 2.9b). Ce comparatif illustre le phénomène de la vallée dérangement (*Uncanny Valley*) [Mori, 1970; Mori *et al.*, 2012]. Les personnages de ces deux jeux sortis en 2017 présentent des niveaux d’expressivité drastiquement différents. Si Mass Effect : Andromeda a essuyé de nombreuses critiques négatives engendrant le développement d’un correctif, Hellblade à quant à lui été plébiscité pour ses animations mettant en œuvres des techniques de capture des mouvements faciaux.

À la lumière des constats des travaux de Lugin *et al.* [2015], le recours volontaire à des avatars non réalistes peut permettre de maximiser leur potentiel d’acceptation pour l’utilisateur en ne s’exposant pas au risque de tomber dans la vallée dérangement. Cependant, nos études portant sur l’impact de la fidélité visuelle des avatars, notamment de la véracité, impliquent le recours à des personnages présentant un haut niveau de réalisme. Dans ce contexte, le phénomène de la vallée dérangement se doit d’être considéré afin de limiter son impact sur nos observations [Seymour *et al.*, 2017b].

Nos investigations portant uniquement sur la relation entre l’utilisateur et son avatar, nous devons concentrer nos efforts sur la cohérence comportementale liée à la capture et à la restitution synchrone des mouvements du corps. Néanmoins, l’absence de situation de co-présence ou de confrontation à des agents humanoïdes autonomes permet d’éviter l’animation des visages de ces entités sociales. Ainsi, nous ne sommes pas confrontés aux contraintes techniques évoquées précédemment concernant la détection des expressions faciales. De plus, la synchronisation des mouvements du corps des utilisateurs permettra d’assurer la cohérence visuelle et comportementale contribuant à l’acceptation et à la plausibilité des avatars issus de reconstructions 3D et présentant des niveaux élevés de réalisme et de véracité.

2.5.3 Avatars et implications comportementales

Nous allons à présent aborder le dernier point de notre revue de littérature concernant les implications comportementales induites par l'apparence des avatars. Les recherches de Yee et Bailenson [2007, 2009] et Yee *et al.* [2009] ont révélé l'influence potentielle du modèle des personnages virtuels incarnés sur le comportement, les réactions et les décisions des utilisateurs. Un phénomène qu'ils intituleront « effet Proteus » reposant sur l'hypothèse que le comportement des individus se conforme à leur représentation virtuelle et ce indépendamment de la manière dont les autres les perçoivent.

L'effet Proteus fut nommé ainsi en référence au dieu issu de la mythologie grecque Protée (*Proteus* en latin) ayant la capacité de se métamorphoser, d'où l'origine de l'adjectif protéiforme désignant une entité en mesure de se présenter sous différentes formes. Cet effet se manifeste par la convocation des stéréotypes de l'utilisateur vis-à-vis de l'apparence de l'avatar et repose sur deux fondements théoriques :

- **La théorie de la perception de soi** (*self-perception theory*) [Bem, 1972]. Cette théorie décrit le processus consistant à inférer ses attitudes et ses émotions à partir de l'observation de soi. Ainsi, l'observation de nos propres réactions face à une situation peut conduire à la modification de notre attitude. Par extension, l'observation de notre apparence, ou celle de notre avatar [Peña *et al.*, 2009], affecte la perception que nous avons de nous-mêmes, induisant des adaptations comportementales.
- **La désindividuation** (*deindividuation*). Ce phénomène se manifeste par l'anonymat ou l'inclusion dans un groupe induisant une diminution de la conscience de soi, une perte d'identité. De cette perte d'identité peut résulter des comportements pro- ou anti-sociaux comme le démontre les travaux de Johnson et Downing [1979].

Au regard de ces définitions, l'effet Proteus reposerait sur la synergie de la désindividuation agissant comme un déclencheur permettant d'accroître les effets de la théorie de la perception de soi et de son influence sur le comportement des utilisateurs :

Les utilisateurs qui sont désindividuéés dans les environnements en ligne peuvent adhérer à une nouvelle identité qui est inférée de leurs avatars. [...] les utilisateurs des environnements en ligne peuvent se conformer aux attentes et aux stéréotypes de l'identité de leurs avatars. [Yee *et al.*, 2009] [Traduction].

Les études initiales de Yee et Bailenson [2007, 2009] et Yee *et al.* [2009] ont révélé la multiplicité des implications de l'effet Proteus en environnement virtuel au travers des médiums

du jeu vidéo et de la réalité virtuelle. Ces études démontrent que la taille et l'attractivité des avatars peuvent influencer le comportement des utilisateurs et leurs interactions sociales [Yee et Bailenson, 2007; Yee *et al.*, 2009]. Ainsi, l'incarnation d'avatars présentant des caractéristiques physiques avantageuses en situation de co-présence suscitera un sentiment de confiance chez l'utilisateur qui modulera en conséquence son comportement et ses interactions avec son interlocuteur. Par ailleurs, il semble que la morphologie et l'attractivité des personnages de jeux de rôle en ligne massivement multijoueur (MMORPG) affectent également les performances et la progression des joueurs [Yee et Bailenson, 2009].

Des études subséquentes portant sur l'incarnation en environnement immersif ont identifié de nombreux impacts comportementaux liés à l'apparence des modèles des avatars. Ces recherches illustrent la pluralité des facteurs pouvant affecter le comportement. La morphologie s'avère être un critère déterminant concernant l'attitude des utilisateurs. Ainsi, l'incarnation d'un avatar de grande taille induit une confiance accrue et une plus grande agressivité dans une tâche de négociation [Yee *et al.*, 2009]. L'incarnation par des participants adultes d'un avatar présentant une morphologie enfantine induit en revanche une altération de la perception de l'environnement et du mode de prise décision, au profit d'un mode cohérent avec le corps virtuel [Banakou *et al.*, 2013]. Cependant, bien que la morphologie de l'avatar puisse influencer le comportement des utilisateurs, elle n'est pas toujours suffisante pour modifier les habitudes et attitudes réelles des utilisateurs [Verhulst *et al.*, 2018]. Néanmoins, les travaux de Lugin *et al.* [2016] mettent en évidence l'influence de la nature des avatars sur l'émergence ou l'inhibition de peurs communes en environnement virtuel immersif telles que l'acrophobie. Ici, l'apparence de l'entité incarnée semble influencer le sentiment de sécurité lorsque les utilisateurs sont exposés à de hautes altitudes. Les utilisateurs incarnant un avatar à l'apparence plus robuste (robot) auront alors moins tendance à craindre la proximité avec le vide que les utilisateurs incarnant un avatar humain classique. Les recherches de Kiltani *et al.* [2013] illustrent, quant à elles, l'impact implicite des stéréotypes raciaux pouvant induire des comportements associés. Dans cette expérimentation, les participants incarnant des avatars à la tenue vestimentaire décontractée et à la peau noire présentent une augmentation significative de la variation et de la fréquence des mouvements en jouant des percussions. Ce constat s'inverse pour les utilisateurs incarnant un avatar à la peau blanche et à la tenue formelle.

Si la théorie de l'effet Proteus illustre l'impact de l'apparence des avatars sur le comportement des utilisateurs, il est également démontré que l'incarnation de personnages à forte connotation culturelle peut avoir un impact cognitif. Ainsi, les travaux de Osimo *et al.* [2015]

démontrent qu'incarner un avatar représentant Sigmund Freud²⁴ (Figure 2.10a) induit suffisamment de détachement pour permettre aux participants de modifier leurs modes de pensée et de raisonnement habituels. Dans ce même contexte, les recherches de Banakou *et al.* [2018] démontre qu'incarner Albert Einstein²⁵ (Figure 2.10b) induit une amélioration des performances lors de l'exécution de tâches cognitives. De plus, la revue de littérature proposée par Hudson et Hurter [2016] suggère que, dans un contexte d'apprentissage, l'apparence des avatars pourrait avoir un impact sur la motivation des apprenants. Ainsi, ces travaux illustrent les potentialités résidant dans l'incarnation d'avatars, qui, si judicieusement adaptés aux contextes et aux usages, permettent un conditionnement comportemental tout en optimisant les capacités cognitives des utilisateurs.

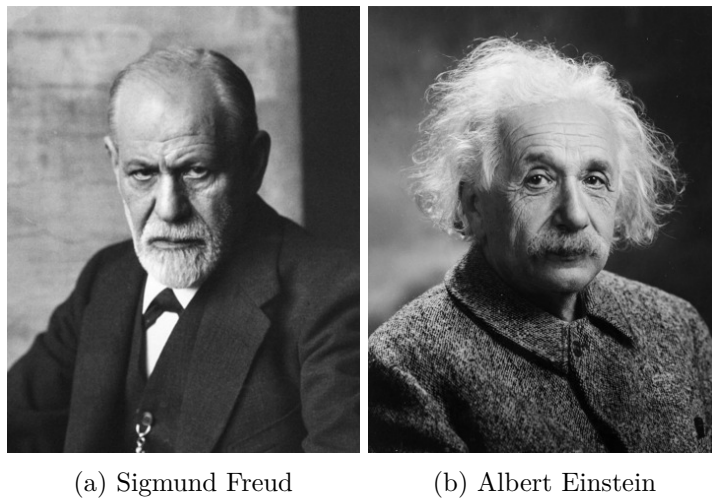


FIGURE 2.10 – Portraits de Sigmund Freud (2.10a) et d'Albert Einstein (2.10a).

Notre revue de littérature illustre ainsi la pluralité des facteurs pouvant impacter le sentiment d'incarnation ainsi que la capacité des avatars à influencer le comportement des utilisateurs. Dans les différents cas d'utilisation évoqués, conformément à la théorie de l'effet Proteus, la désindividuation et la théorie de la perception de soi agissent de concours pour affecter le comportement des utilisateurs. Cependant, dans le contexte de nos recherches portant sur l'impact de la véracité, l'utilisation de doubles virtuels ne conduira pas à la désindividuation en raison du manque d'anonymat induit par l'intégration de la représentation des participants. À titre d'exemple, l'étude de Lucas *et al.* [2016] intégrant des doppelgängers dans un jeu vidéo ne permet pas d'identifier un impact significatif de l'apparence des avatars sur le comportement et les performances des utilisateurs, bien qu'elle influence positivement leur expérience subjective.

24. Sigmund Freud, neurologue fondateur de la psychanalyse, né le 6 mai 1856 à Freiberg (Autriche) (actuelle République tchèque), mort le 23 septembre 1939 à Londres.

25. Albert Einstein, physicien théoricien et auteur de la théorie de la relativité, né le 14 mars 1879 à Ulm, dans le Wurtemberg (Allemagne), mort le 18 avril 1955 à Princeton, dans le New Jersey (États-Unis).

Nos travaux de recherche se proposent ainsi de poursuivre les investigations en ce sens afin d'identifier l'impact de la fidélité visuelle des avatars, en particulier de la véracité, sur le sentiment d'incarnation et son effet sur le comportement des utilisateurs en environnement virtuel immersif. Ainsi, un de nos objectifs de recherche consiste à déterminer si l'incarnation d'un avatar à notre image induit des comportements visant à préserver cette entité. *A contrario*, nous ambitionnons d'étudier si le contrôle d'avatars disposant d'un schéma corporel anthropomorphique, mais ne présentant pas de traits humains identifiables, permet l'induction d'attitudes associées et légitimées par leur apparence.

2.6 Synthèse de l'état de l'art

Nous arrivons au terme de notre revue de littérature au travers de laquelle nous avons étudié les notions centrales permettant de définir le cadre théorique de nos études sur les modalités perceptives et graphiques impactant l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif. À la lumière de nos recherches bibliographiques, et conformément à nos objectifs initiaux, il fut dès lors envisagé de mener nos investigations sur l'influence du point de vue et de la fidélité visuelle des avatars sur les sentiments de présence et d'incarnation, ainsi que sur le comportement et les performances des utilisateurs.

Notre revue a initialement introduit le concept d'avatar, notamment dans la cadre d'applications 3D temps réel. Ainsi, nous avons caractérisé les éléments différenciant un avatar, entité contrôlée par un être humain et répondant aux commandes de ce dernier, d'un agent virtuel autonome, personnage contrôlé par des algorithmes régissant son comportement.

À l'issue de la présentation de notre objet d'étude, nous avons retracé l'origine de la notion d'expérience utilisateur reposant initialement sur le concept d'utilisabilité. Suite à la présentation des définitions normées de ces concepts, nous avons dressé une synthèse des différents modèles d'expérience utilisateur appliqués aux environnements immersifs (Tableau 2.1) afin de définir notre cadre théorique global et d'identifier les composantes de ces modèles faisant l'objet de nos investigations. Nous avons dès lors présenté les concepts fondamentaux d'immersion, de présence et d'incarnation et constaté la pluralité des études ambitionnant d'apporter et de stabiliser leurs définitions, sans qu'un consensus ne soit aujourd'hui observé au sein des différentes disciplines étudiant ces concepts.

Après avoir retracé l'origine de la présence en environnement virtuel, nous avons proposé un comparatif des différentes catégorisations de cette notion identifiées dans la littérature (Tableaux 2.2 et 2.3). Dans le cadre de nos travaux, nous avons choisi d'adopter la proposition de Lee [2004] définissant la présence comme un état psychologique où la virtualité de l'expérience n'est pas décelée. Cette proposition établit une catégorisation de cette notion en trois dimensions : la présence physique, la présence sociale et la présence de soi. Nous avons ultérieurement défini le concept d'incarnation et les mécanismes à l'œuvre dans ce processus d'appropriation d'une entité virtuelle ou factice. Suite à la présentation du paradigme initial de la main de caoutchouc [Botvinick et Cohen, 1998], nous avons analysé les différentes dimensions du sentiment d'incarnation en environnement virtuel. Il fut ainsi adopté la théorie de Kilteni *et al.* [2012] définissant l'incarnation comme le sentiment émergeant lorsque les propriétés d'un corps virtuel sont traitées comme si elles étaient celles du corps

biologique. Cette théorie identifie trois dimensions permettant l'induction de ce sentiment : la localisation de soi, le sentiment d'agentivité et le sentiment de possession. Les méthodes d'évaluation des sentiments de présence et d'incarnation en environnement immersif seront présentées dans le prochain chapitre dédié à la méthodologie mise en œuvre dans le cadre de nos recherches. Nous introduirons à cette occasion un méta-modèle théorique basé sur notre revue de littérature illustrant les liens identifiés entre les notions de présence et d'incarnation. La proposition de ce modèle aboutira à la construction d'un questionnaire exploité lors de nos expérimentations.

À l'issue de la présentation du concept d'expérience utilisateur et des composantes étudiées dans le cadre de nos travaux, la restitution de nos recherches bibliographiques s'est portée sur les deux axes fondamentaux faisant l'objet de nos expérimentations. Le premier de ces axes concerne la notion de point de vue, facteur déterminant dans la perception de l'espace et du corps virtuel incarné. Il fut ainsi illustré les nombreuses modalités de point de vue adaptées à la production de jeu vidéo et leur impact sur la jouabilité, avant de circonscrire le périmètre de nos recherches aux points de vue à la première et à la troisième personne. Nous avons ainsi constaté la divergence des résultats des études à ce sujet concernant l'expérience utilisateur. Par ailleurs, rares sont les travaux préalables investiguant l'impact du point de vue sur le sentiment d'incarnation en environnement immersif dans des situations impliquant le contrôle d'un avatar via un procédé de synchronisation visuomotrice, confirmant dès lors l'intérêt de notre première question de recherche :

***Q1 :** Quel est l'impact du point de vue sur les sentiments de présence et d'incarnation, ainsi que sur les performances des utilisateurs en matière de navigation et d'interactions en environnement virtuel immersif ?*

Cette question de recherche fait l'objet de notre première expérimentation, présentée dans le chapitre 4, dédiée à l'étude de l'impact des points de vue à la première et à la troisième personne sur les sentiments de présence physique et d'incarnation ainsi que sur les performances de navigation et d'interaction en environnement immersif.

Le second axe de nos recherches porte sur la notion de fidélité des avatars, notion s'avérant scindée en deux dimensions majeures : la fidélité visuelle et la fidélité comportementale. Il est à noter que le périmètre de nos investigations restreint le cadre de nos recherches à l'étude de la fidélité visuelle. Dans ce contexte, l'ensemble de nos expérimentations intègre des avatars présentant un niveau de fidélité comportementale réaliste et constant induit par des dispositifs de capture de mouvement. La notion de fidélité visuelle fait quant à elle l'objet

de nos recherches portant sur les critères constitutifs de cette notion identifiée par les travaux de Garau [2003] : l'anthropomorphisme, le réalisme et la véracité.

Par ailleurs, nous avons constaté, au travers de la présentation de la théorie de la vallée dérangeante [Mori *et al.*, 2012], l'importance de la cohérence visuelle et comportementale des avatars pour favoriser leur potentiel d'acceptation par l'utilisateur. Ainsi, la mise en œuvre de procédés de reconstruction 3D induisant la présence d'avatars présentant un haut niveau de réalisme et de véracité sera équilibrée par l'utilisation de dispositifs de capture de mouvement devant permettre, *in fine*, l'adéquation des niveaux de réalisme visuel et comportemental. Si la théorie de la vallée dérangeante illustre l'influence du niveau de réalisme des avatars sur leur potentiel d'acceptation, nous avons également souligné l'importance de l'apparence de ces derniers sur le comportement des utilisateurs, notamment via la présentation de l'effet Proteus [Yee et Bailenson, 2007]. Ces considérations nous ont ainsi permis de formuler notre deuxième question de recherche :

***Q2 :** Quel est l'impact de la fidélité visuelle des avatars, notamment de la similarité entre l'utilisateur et l'avatar, sur le sentiment d'incarnation et sur le comportement des utilisateurs en environnement virtuel immersif ?*

Ainsi, notre seconde étude aura pour objectif de déterminer l'impact de la véracité des avatars sur les différentes dimensions du sentiment d'incarnation et d'identifier les implications comportementales liées à la similitude entre l'apparence de l'utilisateur et celle de son avatar. Cette étude se divise en deux expérimentations présentées respectivement dans les chapitres 5 et 6. Ainsi, l'expérimentation restituée dans le chapitre 5 permet d'évaluer l'impact de la véracité des avatars sur leur niveau d'attractivité perçu. Par ailleurs, cette étude confrontant les participants à leur double virtuel issu d'une reconstruction 3D, l'influence du niveau d'estime de soi est également considéré sur le processus de sélection de personnages. La seconde étude de cette série d'expérimentations, présentée dans le chapitre 6, investigate l'impact de la véracité des avatars sur le sentiment d'incarnation en environnement immersif et sur les implications comportementales associées. L'objectif étant ici d'identifier les potentialités induites par l'utilisation d'avatars présentant différents niveaux de fidélité visuelle pour la production d'environnements virtuels immersifs et interactifs.

Chapitre 3

Méthodologie

Sommaire

3.1	Introduction	74
3.2	Proposition d'un Méta-modèle Présence - Incarnation	75
3.3	Évaluation de l'expérience utilisateur	78
3.3.1	Méthodes subjectives : questionnaires et entretiens	78
3.3.2	Élaboration d'un questionnaire	84
3.3.3	Méthodes objectives : analyses physiologiques et comportementales .	87
3.3.4	Confrontation des analyses subjectives et objectives	89

3.1 Introduction

Suite à la restitution de nos recherches bibliographiques présentant les notions fondamentales et le cadre de nos travaux, nous allons à présent aborder les différentes approches méthodologiques mises en œuvre dans nos recherches.

La première partie de ce chapitre présente la proposition d'un méta-modèle ayant fait l'objet d'une publication [Gorisse *et al.*, 2018b]. Ce modèle articule les notions de présence et d'incarnation en soulignant les intrications identifiées entre ces notions dans notre revue de littérature. Nous introduirons par la suite les méthodes d'évaluation de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif. Nous nous focaliserons ici sur les approches subjectives et objectives mises en œuvre dans la cadre d'expérimentations antérieures et permettant notamment l'évaluation des sentiments de présence et d'incarnation. De la confrontation des questionnaires existants et de notre modèle théorique découlera l'introduction d'un questionnaire utilisé lors de nos différentes expérimentations.

3.2 Proposition d'un Méta-modèle Présence - Incarnation

Nous avons introduit, à l'occasion de notre revue de littérature portant sur la notion d'expérience utilisateur (Section 2.3), les notions de présence et d'incarnation en environnement virtuel immersif. La présentation de ces notions et de leurs composantes intrinsèques illustre l'intrication des deux concepts. En effet, les altérations d'ordre psychologique, émotionnel et comportemental liées à la présence de soi [Lee, 2004] seraient en partie induites par le sentiment d'incarnation d'une entité virtuelle. Comme suggéré par Kilteni *et al.* [2012], le sentiment d'incarnation, incluant les facteurs de localisation, d'agentivité et de possession, contribue à la représentation de soi en environnement virtuel. En cela, la définition de ce sentiment rejoint celle de la notion de présence de soi en environnement virtuel initialement introduite par Biocca [1997].

L'identification des similitudes et des intrications entre ces notions nous amène à proposer un méta-modèle théorique agrégé intitulé *Présence - Incarnation* [Gorisse *et al.*, 2018b] illustrant l'inclusion du sentiment d'incarnation dans la notion de présence de soi.

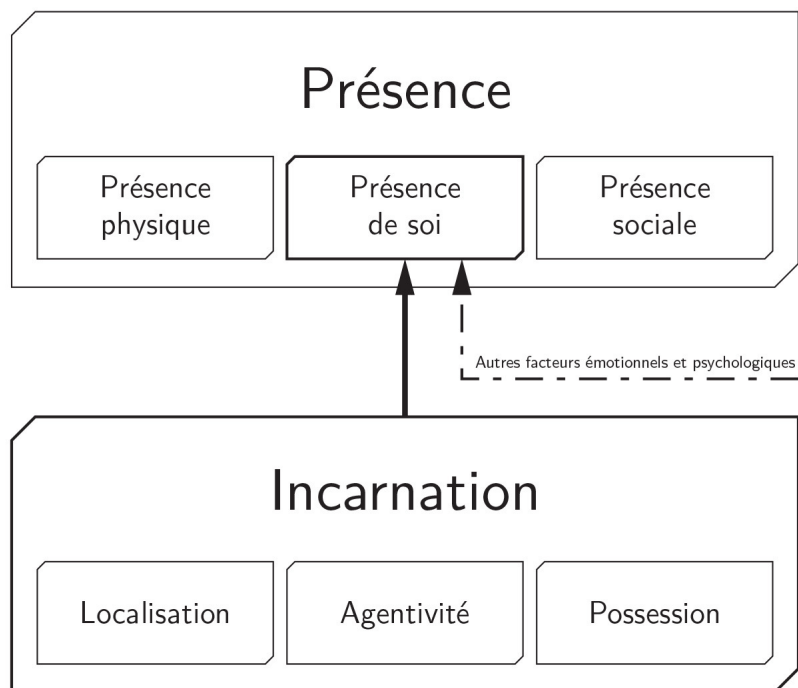


FIGURE 3.1 – Méta-modèle Présence - Incarnation [Gorisse *et al.*, 2018b].

Comme évoqué lors de notre revue de littérature, et conformément au modèle de Lee [2004], les trois dimensions de la présence s'avèrent distinctes et indépendantes. Ainsi, la présence physique concerne le rapport entre l'utilisateur et l'environnement. La présence de soi traite quant à elle de la construction d'un soi alternatif virtuel. Enfin, la présence sociale

concerne la relation entre l'utilisateur et les entités sociales (avatars et agents autonomes). De plus, les résultats observés à l'occasion de notre première étude empirique [Gorisse *et al.*, 2017], présentée dans le chapitre 4, ne révèlent pas de variation significative de la présence physique par rapport aux variations observées concernant le sentiment d'incarnation, confirmant ainsi l'indépendance de ces notions.

Conformément aux propos relatés dans l'article de Kilteni *et al.* [2012], nous considérons que le concept d'incarnation se focalise sur la relation entre le soi et le corps incarné (ici virtuel). Ainsi, les dimensions de l'incarnation apparaissent comme des éléments prépondérants dans l'émergence du sentiment de présence de soi en environnement virtuel immersif. Les investigations menées dans le cadre de nos recherches n'étudient cependant pas les implications d'autres aspects émotionnels et psychologiques [Lee, 2004; Ratan, 2010] pouvant influencer le concept de présence de soi ([Kilteni *et al.*, 2012] P.382). C'est pourquoi, tel que le suggère la seconde flèche du modèle (flèche non continue), nous préférons laisser la porte ouverte aux réflexions portant sur l'impact de divers facteurs, tels que l'immersion psychologique (niveau diégétique), la scénarisation, etc. Dans ce contexte, l'identification et l'étude de ces facteurs demeurent nécessaires afin de parachever la construction du modèle proposé.

Préalablement à la proposition d'un questionnaire permettant l'évaluation des facteurs de ce modèle, nous allons évoquer les différentes méthodes d'évaluation des sentiments de présence et d'incarnation. Ces méthodes permettent notamment de recueillir le ressenti subjectif des participants immergés dans un dispositif de réalité virtuelle. L'intention derrière le développement de notre questionnaire n'est pas la proposition d'un outil psychométrique fiabilisé, bien que celui-ci se base sur de précédents questionnaires éprouvés. En effet, les panels recrutés à l'occasion des études menées dans le cadre de nos travaux de recherche ne sont pas suffisamment conséquents pour valider statistiquement la structure de ce dernier. Sa stabilisation nécessitera donc le recours à de nouvelles expérimentations afin d'en permettre la validation statistique.

D'un point de vue méthodologique, nous verrons qu'il est également pertinent d'évaluer les facteurs du modèle proposé via la corrélation des résultats du questionnaire et de méthodes d'analyse qualitatives à l'image d'entretiens post-passation. Ces phases de dialogue offrent la possibilité aux participants de s'exprimer librement sur l'expérience vécue. Une analyse sémantique des retranscriptions de ces entretiens permet notamment d'identifier les propos récurrents et de recueillir des réflexions potentiellement non évoquées dans les réponses apportées au questionnaire. Ainsi, le croisement de ces analyses permet de rendre compte et de retranscrire au mieux l'expérience vécue par les utilisateurs.

Ainsi, le modèle proposé ici constitue un fondement théorique permettant le développement d'outils d'analyse de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif. Si l'ensemble des études menées dans le cadre de nos recherches porte sur les composantes décrites par ce méta-modèle, il conviendra néanmoins d'œuvrer à l'identification d'autres facteurs impactant les dimensions de ce dernier. Néanmoins, nous espérons que l'effort de théorisation des concepts d'incarnation et de présence, ainsi que la proposition d'un modèle et d'un questionnaire associé dont la construction sera présentée dans le chapitre suivant, contribueront aux investigations futures portant sur l'expérience procurée lors de l'utilisation de systèmes de réalité virtuelle.

3.3 Évaluation de l'expérience utilisateur

Nous allons aborder ici les méthodes d'évaluation des sentiments de présence et d'incarnation. Nous présenterons notamment le développement du questionnaire psychométrique permettant l'évaluation des composantes du modèle *Présence - Incarnation* introduit dans la section précédente. Dans le cadre de nos recherches, nous porterons une attention particulière sur les méthodes d'évaluation de la présence physique et de la présence de soi [Lee, 2004], ainsi que sur les trois dimensions du sentiment d'incarnation [Kiltner *et al.*, 2012] : la localisation de soi, le sentiment d'agentivité et du sentiment de possession. Nous constaterons dès lors l'existence d'une grande diversité d'approches subjectives et objectives permettant d'évaluer ces notions.

Il est à noter que cette section n'a pas vocation à présenter de manière exhaustive les moyens de mesure existants. Nous proposons ici de synthétiser les principaux outils psychométriques ayant permis le développement du questionnaire exploité dans le cadre de nos expérimentations. Nous ferons également un tour d'horizon des méthodes de mesures objectives mises en œuvre lors d'études préalables. Par ailleurs, les travaux de Van Baren et IJsselstein [2004] présentent une revue étendue d'un grand nombre d'outils permettant l'évaluation des diverses formes de présence évoquées dans notre revue de littérature.

3.3.1 Méthodes subjectives : questionnaires et entretiens

Nous allons tout d'abord introduire les méthodes d'évaluation subjectives de l'expérience utilisateur. Ces méthodes se focalisent essentiellement sur le ressenti de chaque participant. Une évaluation subjective est ainsi relative à l'individu et relève d'un jugement personnel. Si nous évoquerons dans la suite de ce chapitre l'intérêt des méthodes objectives pouvant permettre d'étayer certaines de nos hypothèses, il n'en demeure pas moins que la notion d'expérience utilisateur demeure subjective par nature. Ainsi, certains auteurs, à l'image de Sheridan [1992], considèrent la présence comme un sentiment subjectif nécessitant dès lors de faire principalement appel à des méthodes d'évaluation adaptées. Il s'agit ici essentiellement d'une question de posture scientifique : est-ce la réalité objective des faits ou la perception qu'en a l'utilisateur qui importe réellement ?

Bien qu'il soit possible d'observer des résultats similaires et d'effectuer des analyses croisées à l'aide des approches subjectives et objectives, nous verrons que ces résultats peuvent parfois s'avérer contradictoires. En effet, la perception et le ressenti des participants ne sont pas toujours en adéquation avec les données mesurables. Or, dans ces circonstances, il est

nécessaire de faire preuve de discernement au regard du positionnement de nos recherches. Ainsi, dans le cadre de nos investigations portant sur les sentiments de présence et d'incarnation, une part prépondérante sera accordée au ressenti subjectif des utilisateurs. Les méthodes d'évaluation permettant le recueil de données subjectives peuvent être catégorisées en deux approches distinctes : l'approche qualitative et l'approche quantitative.

Approche qualitative

L'approche qualitative permet de collecter des données verbales ou textuelles. Elle s'avère essentiellement exploitée en sciences humaines et sociales, notamment dans des disciplines telles que la psychologie, la sociologie, etc. Différents outils et méthodes permettent la collecte de données qualitatives :

- **Observation directe** : l'observation directe permet la collecte de données sur le terrain. L'étude de cas peut, par exemple, permettre l'étude approfondie d'un individu ou d'un groupe. Ce type de méthode permet l'observation d'une situation spécifique. En cela, elle peut constituer un outil de validation de modèles et de théories, mais permet difficilement de généraliser les résultats obtenus à une population plus large.
- **Entretiens non-directifs** : entretien informel laissant le participant s'exprimer librement sur le sujet introduit par le chercheur. Les interventions sont ici limitées au minimum, le rôle de ce dernier consistant uniquement à relancer le participant en cas d'interruption via la reformulation de ses derniers propos.
- **Entretiens semi-directifs** : entretien orienté par des questions ouvertes posées par le chercheur sur des thèmes prédéfinis permettant d'aborder les notions centrales du sujet d'étude.
- **Entretiens directs** : entretiens majoritairement constitués de questions spécifiques et fermées. L'ordre et la formulation de ces questions doivent être similaires pour l'ensemble des participants interrogés.
- **Groupe de discussion** : entretien d'un groupe constitué d'un animateur et de participants sélectionnés spécifiquement pour mener une discussion autour de l'objet d'étude.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons opté pour la mise en place d'entretiens semi-directifs à l'issue de chaque expérimentation. Ces entretiens nous permettent notamment d'interroger les participants sur leur ressenti subjectif vis-à-vis de l'expérience proposée. Ils sont ainsi invités à s'exprimer sur les notions faisant l'objet de nos études, telles que l'impact du point de vue et de la fidélité visuelle des avatars sur les sentiments de présence et d'incarnation. Cependant, ces concepts ne sont jamais évoqués dans la formulation des questions

listées dans les guides d'entretien. La subtilité de ce type d'échange consiste à amener le participant à s'exprimer sur ces questionnements sans en influencer la réponse. Pour procéder à l'analyse de ces entretiens, il est tout d'abord nécessaire de retranscrire l'ensemble du discours *verbatim*. Il est dès lors possible de procéder à des analyses sémantiques permettant de catégoriser les informations relatées par les participants et d'identifier la présence de propos récurrents afin de les confronter à nos observations quantitatives. Par ailleurs, ces entretiens permettent également de recueillir des propos pouvant porter à notre attention de nouvelles considérations pertinentes dans le cadre de nos recherches.

Approche quantitative

L'approche quantitative génère quant à elles des données numériques permettant dès lors de procéder au traitement statistique des informations collectées. Ainsi, l'utilisation de questionnaires psychométriques constitués d'échelles de Likert¹ [Likert, 1932] ou d'échelles sémantiques différentielles² [Osgood *et al.*, 1956] permet d'évaluer et de quantifier un ressenti subjectif. Le recours ultérieur à des méthodes de traitement statistiques inférentielles sur les données collectées permet de comparer l'impact des différentes modalités d'une expérimentation. L'objectif de ces analyses étant de pouvoir généraliser les résultats obtenus sur un échantillon d'une population à l'ensemble de cette même population. Cette méthode d'évaluation subjective est de loin la plus utilisée pour évaluer les sentiments de présence et d'incarnation en environnement virtuel. Nous allons ainsi comparer différents questionnaires afférents à ces notions dans la suite de ce chapitre (Tableau 3.1) afin de permettre la constitution d'un questionnaire dédié à nos expérimentations. Il est à noter que certaines dimensions de ce questionnaire seront adaptées en fonction de l'objet de recherche de nos différentes études. Les items spécifiques seront détaillés lors de la présentation des outils de mesure de chacune des expérimentations.

1. L'échelle de Likert est un outil psychométrique permettant de mesurer une attitude chez des individus. Ces échelles sont constituées d'affirmations pour lesquelles la personne interrogée exprime son degré d'accord ou de désaccord. Chaque échelle présente une graduation comprise entre cinq et sept possibilités de réponse permettant de définir le degré d'acceptation avec l'énoncé de chaque item. Le niveau central des échelles impaires permet d'exprimer un avis neutre. Les échelles présentant un nombre pair de modalités sont quant à elles qualifiées d'échelles à choix forcé.

2. L'échelle sémantique différentielle est un outil psychométrique permettant de mesurer une attitude chez des individus. Un item est généralement évalué sur une échelle présentant sept graduations séparant deux termes en opposition. À l'image des échelles de Likert présentant un nombre impair de possibilités de réponse, le point milieu permet d'exprimer un avis neutre. Cependant, il n'est pas d'usage de donner un libellé explicite aux différents niveaux de graduation de l'échelle.

TABLEAU 3.1 – Synthèse de questionnaires permettant l'évaluation des différents facteurs de la notion de présence en environnement virtuel immersif. Les questionnaires sont répartis suivant les facteurs communs avec la catégorisation de la présence de Lee [2004]. Les dimensions ne pouvant figurer dans ces catégories et évaluant des notions connexes liées à l'expérience utilisateur sont listées dans une colonne dédiée.

	Présence physique	Présence sociale	Présence de soi	Autre(s) dimension(s)
Slater-Usch-Steed Questionnaire (SUS) [Slater <i>et al.</i> , 1994]	X			
Presence Questionnaire (PQ) [Witmer et Singer, 1998]	X			Engagement, stimulations, interaction, etc.
Ingroup Presence Questionnaire (IPQ) [Schubert <i>et al.</i> , 2001]	X			Engagement, réalisme.
Swedish Viewer-User Presence Questionnaire (SVUP) [Larsson <i>et al.</i> , 2001]	X			Amusement, effets négatifs, interaction, etc.
ITC Sense of Presence Inventory (ITC-SOPI) [Lessiter <i>et al.</i> , 2001]	X			Engagement, effets négatifs.
Networked Mind Measure of Social Presence [Biocca et Harms, 2002]		X		
MEC Spatial Presence Questionnaire (MEC-SPQ) [Vorderer <i>et al.</i> , 2004]	X			
Temple Presence Inventory (TPI) [Lombard <i>et al.</i> , 2009]	X	X		Engagement, réalisme (social et perceptuel).
Self-Presence Questionnaire (SPQ) [Ratan et Hasler, 2009]			X	

La synthèse que constitue notre tableau illustre la multitude de questionnaires permettant de procéder à l'évaluation de la présence physique. Afin de pouvoir constituer la dimension de notre questionnaire évaluant cette notion, nous allons à présent confronter et discuter ces outils psychométriques :

- Le SUS [Slater *et al.*, 1994] paru en 1994 est un des premiers questionnaires portant sur la notion de présence et a contribué aux études pionnières des années 90. Cependant, celui-ci ne s'avère constitué que de trois items. Or, la progression des connaissances a depuis permis une compréhension plus éclairée des mécanismes sous-jacents induisant la construction de questionnaires permettant une analyse plus fine du sentiment de présence.
- Le PQ [Witmer et Singer, 1998] présente une factorisation ne correspondant pas au cadre théorique décrit dans notre revue de littérature. En effet, ce questionnaire se base sur des acceptions divergentes des notions constitutives de l'expérience utilisateur telles que considérées dans nos recherches. Ainsi, bien qu'il soit largement utilisé dans de multiples travaux portant sur le sentiment de présence en environnement virtuel, ce dernier amalgame des items afférents aux notions de présence physique, d'immersion et d'engagement. Sa constitution, critiquée par la communauté [Slater, 1999], ne peut permettre d'identifier avec exactitude l'impact de nos variables sur le sentiment de présence physique des utilisateurs.
- l'IPQ [Schubert *et al.*, 2001] a été constitué via l'agrégation d'items issus de questionnaires antérieurs. Ce dernier présente l'avantage de disposer d'une traduction française validée et possède une dimension dédiée à la présence physique. Cependant, celui-ci ne sera pas exploité lors de nos études, sa construction ne s'avérant pas en adéquation avec certaines préconisations fondamentales liées à l'élaboration d'un questionnaire. En effet, certains items évoquent littéralement les concepts étudiés. Or, comme le rappellent Lessiter *et al.* [2001], le concept de présence n'étant pas une notion familière aux participants potentiels, il ne semble pas pertinent de demander à ces derniers d'évaluer, littéralement, leur niveau de présence perçue dans l'environnement virtuel.
- Le SUVP [Larsson *et al.*, 2001] porte sur l'évaluation de la présence physique, tout en incluant des items dédiés aux effets négatifs induits par le système de réalité virtuelle, tel que la cinétose. De nombreux items portent également sur l'immersion sonore qui, bien qu'essentielle en environnement virtuel immersif, ne fait pas l'objet de nos investigations.
- l'ITC-SOPI [Lessiter *et al.*, 2001] est un questionnaire comprenant une dimension dédiée à l'évaluation de la présence physique, de l'engagement et des effets négatifs. Bien que

l'article de Lessiter *et al.* [2001] relate la construction du questionnaire, les items ne sont pas disponibles dans le corps de la publication. Nous n'avons donc pu considérer ces derniers lors de l'élaboration de notre questionnaire, et ce bien que nous ayons obtenu le document a posteriori en contactant les auteurs.

- Le MEC-SPQ [Vorderer *et al.*, 2004] est un questionnaire dédié à l'évaluation de la présence physique présentant deux facteurs respectivement constitués de huit items : la localisation de soi dans l'environnement virtuel (à ne pas confondre avec la notion de localisation de soi du processus d'incarnation) et les actions possibles. Ces facteurs seront ainsi retenus pour l'élaboration de la dimension permettant l'évaluation de la présence physique du questionnaire dédié à nos expérimentations.
- Le TPI [Lombard *et al.*, 2009], à l'image du PQ, n'est pas en adéquation avec le cadre théorique de nos recherches. Les auteurs ont développé une théorie présentant de nombreuses divergences avec notre positionnement. Cette théorie subdivise la notion de présence en huit facteurs. Par conséquent, les items du questionnaire ne se prêtent pas à l'évaluation de la présence physique telle que considérée dans nos travaux.

L'analyse critique à la lumière de notre revue de littérature des questionnaires existants nous a permis d'identifier et de sélectionner deux facteurs issus du MEC-SPQ [Vorderer *et al.*, 2004] pour la constitution ultérieure de la dimension de notre questionnaire dédié à l'évaluation de la notion de la présence physique.

Concernant l'évaluation de la présence de soi, la littérature actuelle ne propose que peu de ressources exploitables. Ainsi, nous n'avons répertorié que le SPQ [Ratan, 2010] explicitement dédié à l'évaluation de cette notion. Ce questionnaire étant initialement conçu pour l'évaluation de la présence de soi dans un contexte vidéoludique, la formulation de certains items n'est pas adaptée aux environnements virtuels immersifs. De plus, la constitution de ces items laisse à penser que les auteurs considèrent la présence de soi comme une extension de notre corporéité vers l'environnement virtuel. Or, les travaux préalables issus de nos recherches bibliographiques portant sur la réalité virtuelle considèrent ce processus comme un transfert corporel et non comme une extension.

Conformément à notre modèle théorique *Présence - Incarnation* présenté au début de ce chapitre, nous nous reposerons sur les outils psychométriques subjectifs dédiés à l'évaluation du sentiment d'incarnation pour la construction de notre questionnaire. En effet, ce sentiment s'avère être une notion constitutive de la présence de soi en environnement immersif. Cependant, lors de la conception de l'ensemble de nos expérimentations, l'évaluation subjective du sentiment d'incarnation ne bénéficiait pas de questionnaires éprouvés et standardisés. Ainsi,

la constitution de la dimension dédiée de notre questionnaire repose sur l’agrégation d’items identifiés dans différentes études préalables pour l’évaluation de la localisation de soi et des sentiments d’agentivité et de possession.

Il est à noter qu’une publication ultérieure à nos travaux ouvre la voie pour la standardisation d’un questionnaire dédié à l’évaluation du sentiment d’incarnation en environnement immersif [Gonzalez-Franco et Peck, 2018].

3.3.2 Élaboration d’un questionnaire

Suite à l’introduction de notre modèle *Présence - Incarnation* et à la présentation de différents questionnaires portants sur la notion de présence, nous allons à présent aborder la constitution du questionnaire développé pour nos expérimentations. Celui-ci permettra l’évaluation des dimensions liées à la présence physique et au sentiment d’incarnation de notre méta-modèle théorique.

Notre revue des questionnaires existants nous a permis de retenir deux des facteurs du MEC-SPQ [Vorderer *et al.*, 2004] permettant l’évaluation de la présence physique. Ce dernier a été initialement éprouvé sur un panel de participants conséquent (290 participants), démontrant ainsi sa fiabilité et sa robustesse. Chacun des facteurs retenus est respectivement constitué de huit items. D’après les auteurs, l’utilisation de l’ensemble des questions n’est pas obligatoire, la conception de ces facteurs permettant de sélectionner quatre, six ou huit items. Il est à noter qu’un biais de traduction s’avère nécessaire pour les passations de nos expérimentations auprès de panels francophones.

Concernant l’évaluation subjective du sentiment d’incarnation, nous avons évoqué la nécessité de développer une dimension basée sur l’agrégation d’items issus d’études antérieures, notre revue de littérature n’ayant pas permis d’identifier d’outils psychométriques standardisés. La dimension dédiée à l’incarnation de notre questionnaire comportera donc des items principalement inspirés des travaux de Longo *et al.* [2008], Debarba *et al.* [2015] et Argelaguet *et al.* [2016]. Ainsi, le questionnaire permettant l’évaluation des composantes de notre méta-modèle *Présence - Incarnation* s’avère constitué des dimensions et facteurs suivants :

- **Présence physique**, composée de huit items divisés en deux facteurs : localisation environnementale (LE), actions possibles (AP).
- **Incarnation**, composée de dix items répartis en trois facteurs : localisation de soi (LS), sentiment d’agentivité (A) et sentiment de possession (P).

L'ensemble des items du questionnaire (Tableau 3.2) sont présentés sous la forme d'échelles sémantiques différentielles à cinq points, une échelle impaire permettant d'exprimer un avis neutre. Par ailleurs, nous avons fait le choix de présenter ces items sous forme de questions, contrairement à de nombreux questionnaires existants, afin de limiter le biais d'acceptation. En effet, les items présentés sous forme d'affirmations induiront initialement chez les participants une acceptation du propos avant l'initiation du processus de réflexion. En revanche, une question ne suscitera pas l'adhésion immédiate aux propos et induira directement cette phase de réflexion, limitant ainsi les artefacts potentiels sur les données collectées.

Les coefficients alpha de Cronbach ont été calculés en tenant compte des données recueillies dans notre première expérimentation (Chapitre 4) pour vérifier la cohérence interne des items de chaque dimension du questionnaire. Si ces premiers tests semblent démontrer la fiabilité de notre outil psychométrique ($\alpha > 0,8$ pour chaque dimension), il sera néanmoins nécessaire d'œuvrer à la stabilisation de celui-ci lors d'expérimentations ultérieures sur des panels d'utilisateurs plus conséquents.

TABEAU 3.2 – Questionnaire post-expérimentation composé de deux dimensions : présence physique (Localisation Environnementale - **LE**, Actions Possibles - **AP**), Incarnation (Localisation de Soi - **LS**, Agentivité - **A**, Possession - **P**). La mention (r) indique les items aux scores inversés.

ID	Questions
LE-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que vous étiez « réellement là » au sein de l'environnement virtuel ?
LE-Q2	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que les objets de l'environnement virtuel vous entouraient ?
LE-Q3	Dans quelle mesure vous a-t-il semblé que votre position réelle avait changé pour devenir celle de l'environnement virtuel ?
LE-Q4	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression d'être physiquement présent dans l'environnement virtuel ?
AP-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que vous pouviez agir dans l'environnement virtuel ?
AP-Q2	Dans quelle mesure avez-vous eu la sensation de pouvoir vous déplacer parmi les éléments de l'environnement virtuel ?
AP-Q3	Dans quelle mesure les éléments de l'environnement virtuel vous ont donné le sentiment que vous pouviez interagir avec eux ?
AP-Q4	Dans quelle mesure vous a-t-il semblé que vous pouviez faire ce que vous souhaitiez dans l'environnement virtuel ?
LS-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression d'être situé dans le corps virtuel ?
LS-Q2 (r)	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression d'être situé à une certaine distance du corps virtuel, comme si vous regardiez quelqu'un d'autre ?
A-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le corps virtuel bougeait comme vous le vouliez, comme s'il obéissait à votre volonté ?
A-Q2	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le corps virtuel réagissait de la même manière que votre corps ?
A-Q3	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression de pouvoir interagir avec l'environnement de la manière que vous vouliez ?
A-Q4	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression de contrôler le corps virtuel comme s'il s'agissait de votre corps réel ?
P-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le corps virtuel était votre corps ?
P-Q2 (r)	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le corps virtuel était quelqu'un d'autre ?
P-Q3	Quand quelque chose affectait le corps virtuel, avez-vous eu l'impression que votre corps réel était également affecté ?
P-Q4	Dans quelle mesure avez-vous oublié votre corps réel au profit du corps virtuel ?

3.3.3 Méthodes objectives : analyses physiologiques et comportementales

L'approche quantitative subjective de l'évaluation de l'expérience utilisateur demeure majoritairement exploitée dans le cadre des recherches portant sur les notions de présence et d'incarnation en environnement virtuel immersif. Cependant, un pan de la littérature s'attelle au développement d'approches objectives. L'intérêt de ces méthodes, se présentant notamment sous la forme de mesures physiologiques ou comportementales, réside dans l'observation de données mesurables non soumises à la perception subjective des participants, bien que celle-ci s'avère fondamentale dans les études portant sur l'expérience utilisateur.

Analyses physiologiques

Les mesures physiologiques constituent un des premiers éléments d'objectivation de l'expérience utilisateur illustrant la capacité des environnements virtuels à impacter des composantes physiologiques et neurales. Des recherches ont été menées afin de développer des méthodes de mesure objectives permettant d'observer l'impact des variables expérimentales sur la physiologie des participants [Gorisse, 2015; Lee *et al.*, 2015; Pavone *et al.*, 2016; Pérény *et al.*, 2016; Slater *et al.*, 2006, 2009a,b; Thirioux *et al.*, 2010]. Il existe ainsi différents capteurs permettant de collecter des données reflétant l'état physiologique des utilisateurs :

- **Électrocardiogramme** (*electrocardiogram, ECG*) : représentation de l'activité électrique du cœur permettant l'analyse du rythme cardiaque et par conséquent le calcul de la fréquence en battements par minute.
- **Électromyogramme** (*electromyogram, EMG*) : mesure localisée représentant l'activité électrique parcourant les muscles et les nerfs. Ce type de mesure nécessite de sélectionner et de cibler les groupes musculaires susceptibles d'être affectés par les conditions expérimentales.
- **Électroencéphalogramme** (*electroencephalogram, EEG*) : représentation de l'activité du cortex cérébral via l'analyse du signal électrique émis par les neurones et mesuré par des électrodes placées sur le cuir chevelu.
- **Conductance cutanée** (*galvanic skin response, GSR*) : activité électrodermale mesurée à la surface de la peau reflétant l'activité des glandes de sudation. Il est préconisé de recourir à ce type de mesure sur un membre statique, les micro variations mesurées étant affectées par les mouvements des participants.
- **Respiration** : mesure des mouvements thoraciques et abdominaux permettant l'analyse de la fréquence et de l'amplitude respiratoire.

Il est à noter que l'analyse et le traitement des données collectées via ces capteurs physiologiques reposent sur l'interprétation des expérimentateurs. En cela, il est inévitable d'ajouter une part de subjectivité à l'analyse de ces données objectives. En effet, la complexité de leur interprétation réside dans le fait qu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, de modèle objectif permettant d'observer et de quantifier les sentiments de présence et d'incarnation. On parlera alors ici d'indicateurs physiologiques. Ces indicateurs permettent notamment, via l'observation des variations de données, de supputer l'impact des variables expérimentales sur la physiologie des participants et ainsi d'en interpréter les résultats au regard des composantes de l'expérience utilisateur étudiées.

Dans ce contexte, l'un des objectifs du projet « Devenez Avatar », introduit au début de ce manuscrit (Section 1.2), réside dans le développement de mesures objectives permettant l'évaluation du sentiment de présence en environnement immersif [Gorisse, 2015; Perény *et al.*, 2016]. Ce projet de recherche a initialement été mené au Collège de France au sein de l'équipe autonome en neurophysiologie du Professeur Alain Berthoz, dont les travaux portent notamment sur la physiologie de la perception et de l'action [Berthoz, 1997, 2009; Berthoz et Jorland, 2004; Berthoz et Petit, 2006]. Fort de cette expertise, le système de réalité mixte développé permet la capture des paramètres physiologiques des utilisateurs grâce aux capteurs interfacés (ECG, EMG, GSR, respiration). Bien que ce projet démontre la compatibilité d'une installation de réalité mixte et d'un appareillage conjoint de capteurs physiologiques, il nous a également permis d'identifier et de cerner les limites du matériel exploité. Ainsi, les expérimentations menées dans le cadre des travaux de recherches restitués ici ne recourent pas à la capture de données physiologiques. En effet, les mouvements demandés aux participants (navigation naturelle) sont incompatibles avec les prérequis nécessaires à l'utilisation de certains capteurs, la friction de ces derniers venant parasiter les données collectées. De plus, l'appareillage de capture de mouvement exploité dans le cadre de notre première expérimentation (Chapitre 4) s'avère difficilement compatible avec la mise en place de capteurs physiologiques.

Analyses comportementales

Outre les mesures physiologiques, de nombreuses études corrélient leurs analyses subjectives avec l'enregistrement de données comportementales. Néanmoins, il serait ardu de restituer une liste exhaustive des données mesurables, celles-ci dépendant de l'objet d'étude de chaque expérimentation. À titre d'exemple, ces enregistrements peuvent prendre la forme de données reflétant l'attitude des utilisateurs vis-à-vis d'autres entités sociales, telle que l'analyse de la notion de proxémie via l'enregistrement des distances interpersonnelles ob-

servées [Bailenson *et al.*, 2001]. L'enregistrement de l'activité corporelle, et notamment des mouvements permettant de qualifier le niveau d'activité des participants, est également régulièrement employé [Kiltner *et al.*, 2013]. Par ailleurs, l'évaluation des performances telles que la capacité d'interaction et de navigation des utilisateurs en environnement immersif repose également sur la collecte de données objectives (durées, délais, quantité, etc.) [Debarba *et al.*, 2015; Salamin *et al.*, 2010, 2006].

Au-delà de l'analyse des performances des participants et de l'objectivation de l'évaluation de l'expérience utilisateur, nous allons à présent nous intéresser aux potentialités issues de la confrontation des mesures objectives et subjectives, quelles soient qualitatives ou quantitatives.

3.3.4 Confrontation des analyses subjectives et objectives

Dans le cadre d'une étude portant sur l'expérience utilisateur, la confrontation des analyses subjectives et objectives peut permettre de confirmer ou d'infirmer les observations réalisées. Cette confrontation repose sur la comparaison des informations recueillies au travers des questionnaires et des entretiens post-passation avec les données mesurées et indépendantes du vécu de l'utilisateur. En revanche, le ressenti subjectif des participants n'est pas toujours en adéquation avec les données collectées. Ainsi, l'observation de divergences dans les résultats objectifs et subjectifs nous confronte dès lors à un dilemme sur les conclusions à tirer des observations réalisées. Dans ce contexte, le cadre de l'étude s'avère fondamental. En effet, comme évoqué au début de ce chapitre, il s'agit d'une question de posture scientifique nous invitant à la réflexion sur la priorisation de la réalité objective des faits ou de la perception qu'en a l'utilisateur. Si les travaux menés ont pour objectif d'identifier les conditions les plus favorables en matière de performance dans une application immersive, alors une part prépondérante sera accordée aux résultats objectifs. D'un autre côté, si ces travaux ont pour ambition d'analyser les conditions favorables à l'expérience procurée, alors il sera porté davantage de considération à la subjectivité des informations restituées par les participants. Ainsi, dans le cadre de nos recherches, nous accorderons davantage d'importance au ressenti des participants lorsque nous étudierons les notions afférentes à l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif.

Chapitre 4

Expérimentation 1 : point de vue en environnement virtuel immersif

Sommaire

4.1	Résumé	92
4.2	Présentation de l'expérimentation	93
4.3	Matériel et méthodes	95
4.3.1	Application	95
4.3.2	Équipement	96
4.3.3	Participants	96
4.3.4	Procédure	97
4.3.5	Mesures	100
4.3.6	Hypothèses	101
4.4	Résultats	102
4.4.1	Présence physique	102
4.4.2	Incarnation	103
4.4.3	Performances	103
4.5	Discussion	109
4.5.1	Impact du point de vue sur la présence et l'incarnation	109
4.5.2	Impact du point de vue sur les performances	110
4.5.3	Limites de l'étude	112

4.1 Résumé

La conception actuelle des applications de réalité virtuelle repose essentiellement sur la transposition du point de vue des utilisateurs à la première personne (Figure 4.2a). Dans ce contexte, cette expérimentation vise à comparer l'impact et les potentialités induites par l'utilisation des points de vue à la première et à la troisième personne (Figure 4.2b) sur les sentiments de présence physique et d'incarnation, ainsi que sur les performances des utilisateurs confrontés à une série de tâches en environnement virtuel immersif. Nos résultats ne révèlent pas de différences significatives concernant le sentiment de présence physique. Cependant, bien que le sentiment d'incarnation soit élevé avec les deux conditions de point de vue, nos observations confirment l'avantage du recours à la première personne pour induire un sentiment d'incarnation envers un corps virtuel, en particulier concernant la localisation de soi et le sentiment de possession. Toutefois, aucune différence significative n'est observée en ce qui concerne le sentiment d'agentivité. En matière de performances, nos résultats démontrent que le point de vue à la première personne permet des interactions plus précises, tandis que le point de vue à la troisième personne induit une meilleure spatialisation.



FIGURE 4.1 – Illustration du contenu de l'application de réalité virtuelle développée pour l'expérimentation 1 : point de vue en environnement virtuel immersif.

4.2 Présentation de l'expérimentation

Comme l'illustre notre revue de littérature, les sentiments de présence physique et d'incarnation sont des composantes essentielles de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif (Chapitre 2.3). Nous avons dès lors identifié les trois dimensions constitutives du processus d'incarnation [Kilteni *et al.*, 2012] : la localisation de soi, le sentiment d'agentivité et le sentiment de possession du corps virtuel. L'identification des facteurs influençant ces composantes est une étape essentielle afin de permettre le développement d'applications exploitant le potentiel des technologies de la réalité virtuelle.

L'étendue des recherches actuelles permet d'identifier de nombreux facteurs affectant le niveau d'immersion technologique des dispositifs immersifs [Cummings et Bailenson, 2016; Slater, 1999; Slater et Wilbur, 1997] : le champ de vision, la capture de mouvement ou encore la stéréoscopie. Cependant, les études portant sur la notion de point de vue et ses conséquences sur le sentiment d'incarnation divergent. Certaines démontrent que le point de vue à la première personne serait la condition la plus appropriée pour induire un sentiment d'incarnation élevé [Maselli et Slater, 2013; Petkova *et al.*, 2011; Slater *et al.*, 2010], tandis que d'autres n'observent pas de différences significatives entre les deux points de vue [Debarba *et al.*, 2015] (Figure 4.2, Annexe A.1 Figure A.1)). De plus, nous avons constaté que peu d'études analysent la relation entre le point de vue et la performance des utilisateurs en ce qui concerne la navigation et les interactions en environnement virtuel immersif [Covaci *et al.*, 2014; Debarba *et al.*, 2015; Salamin *et al.*, 2010]. Ainsi, notre étude se propose de poursuivre les investigations nécessaires, notamment dans le cadre d'un cas d'usage proche de ce que l'industrie du jeu vidéo pourrait proposer grâce à la démocratisation actuelle de la réalité virtuelle.

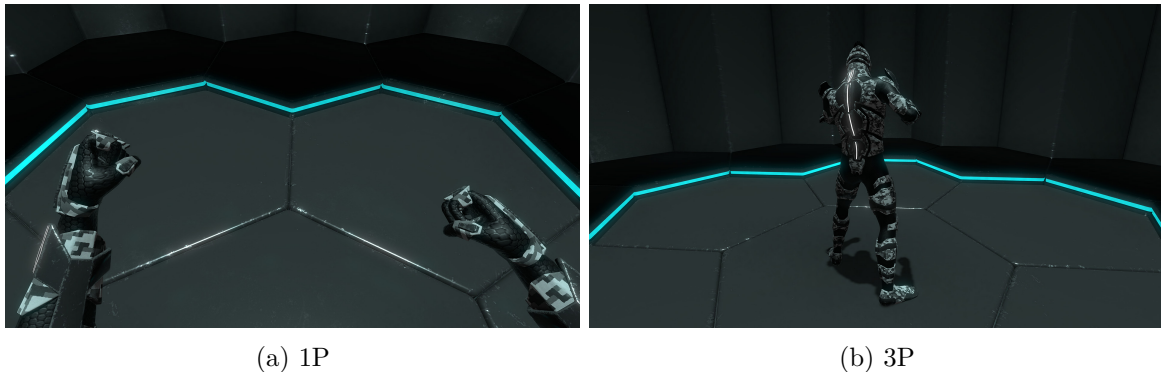


FIGURE 4.2 – Personnage virtuel contrôlé en temps réel par les utilisateurs perçu depuis un point de vue à la première (4.2a) et à la troisième personne (4.2b).

Cette première expérimentation menée dans le cadre de nos travaux de recherche ambitionne de déterminer l'impact du point de vue (Chapitre 2.4) sur l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif. L'objectif consiste ici à évaluer l'influence et les potentialités induites par les points de vue à la première et à la troisième personne (Figure 4.2) sur les sentiments de présence physique et d'incarnation, ainsi que sur les performances des utilisateurs en matière d'interaction et de navigation. Les résultats observés lors de cette étude servent par ailleurs de support aux expérimentations subséquentes portant sur l'impact de la fidélité visuelle des avatars.

Le premier axe de cette expérimentation consiste à déterminer l'impact du point de vue sur le sentiment de présence physique et sur le sentiment d'incarnation. Dans ce contexte, l'utilisateur est représenté sous la forme d'un avatar contrôlé par un système de capture de mouvement temps réel permettant de restituer ses mouvements au sein de l'environnement virtuel. L'évaluation subjective des notions de présence et d'incarnation repose sur un questionnaire et des entretiens post-passation. Le deuxième axe de notre étude se focalise sur les implications relatives à la notion de point de vue concernant la capacité de perception, de navigation et d'interactions des participants. Ces critères sont évalués de manière objective via l'enregistrement par l'application des données relatives aux performances des utilisateurs. Ces données sont également confrontées aux résultats subjectifs recueillis par le biais du questionnaire et des entretiens post-passation afin d'analyser l'aisance du participant avec les points de vue utilisés.

La prochaine partie de ce chapitre présente l'expérimentation et l'ensemble de son protocole. La partie 4.4 restitue l'analyse des données collectées. Ces résultats sont discutés dans la partie 4.5, préalablement à l'évocation des limites de notre dispositif et à la conclusion de cette première étude.

4.3 Matériel et méthodes

4.3.1 Application

L'application utilisée dans le cadre de cette expérimentation a été développée à l'aide du moteur de jeu Unity¹. L'univers proposé puise ses inspirations dans le monde de la science-fiction (Figure 4.1), fréquemment utilisé dans la production de contenus vidéoludiques. Ce type d'environnement permet notamment de justifier les différentes tâches proposées dans le scénario implémenté, ce dernier visant à maximiser l'engagement des participants. Cet univers permet également d'ancrer l'avatar ainsi que le drone, chargé de fournir les instructions lors de la phase d'accommodation, dans un ensemble cohérent. L'environnement virtuel est constitué d'une salle d'entraînement, nécessaire à la phase d'accommodation [Kelly *et al.*, 2014]. Une plate-forme permet ensuite d'accéder à l'arène où se déroulent les différentes tâches. Cette arène est composée de plates-formes hexagonales permettant de moduler dynamiquement l'environnement en fonction des actions à entreprendre. L'ambiance graphique se veut globalement sombre et minimaliste, mais mise en relief par l'utilisation de lumières s'adaptant en fonction des interactions proposées. L'objectif est ici de maximiser l'affordance de l'environnement afin de permettre l'identification des tâches à effectuer.

La première tâche du scénario permet l'analyse de la capacité de perception et d'interaction avec des éléments mobiles. Par ailleurs, les effets sonores de l'environnement ne sont pas spatialisés afin de ne pas biaiser l'évaluation des facultés de perception visuelle par la perception auditive (ne pas recourir à du contenu audio dans l'application aurait également permis d'écarter ce biais, au détriment de l'expérience globale procurée à l'utilisateur). La seconde tâche permet, quant à elle, d'évaluer l'efficacité du participant en matière de navigation et lors d'interactions de précision. Dans ce contexte, l'utilisateur est équipé d'un casque de réalité virtuelle ainsi que d'une combinaison de capture de mouvement permettant de contrôler l'avatar et d'évoluer dans l'environnement virtuel. L'intégration classique du casque induit une vision colocalisée entre l'utilisateur et l'avatar au sein de l'environnement virtuel pour la condition de point de vue à la première personne (Figure 4.2a). Le point de vue à la troisième personne est quant à lui obtenu via le déport de la caméra virtuelle à trois mètres du corps de l'avatar (Figure 4.2b), permettant au participant de percevoir la totalité du corps virtuel. La rotation de la caméra, centrée autour du personnage, s'avère proportionnelle à la rotation de la tête de l'utilisateur (Figure 4.3).

1. Unity est un moteur de jeu multiplateforme développé par Unity Technologies. Le moteur peut être utilisé pour créer des jeux bidimensionnels et tridimensionnels, ainsi que des applications, pour ordinateurs, consoles de salon, smart TV et appareils mobiles.

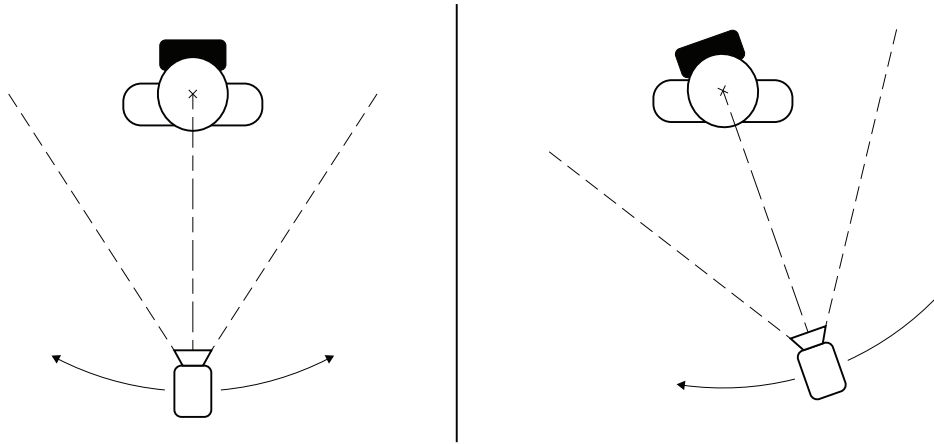


FIGURE 4.3 – Représentation schématique du contrôle du point de vue à la troisième personne.

4.3.2 Équipement

Le casque de réalité virtuelle HTC Vive est utilisé pour afficher l'environnement virtuel avec une définition de 2160 x 1200 pixels (1080 x 1200 pixels par œil), un champ de vision de 110° et un taux de rafraîchissement de 90 Hz. La capture de mouvement permettant aux participants de contrôler l'avatar en temps réel est réalisée grâce à la combinaison sans fil Perception Neuron constitué de 32 capteurs inertiels (gyroscopes 3 axes, accéléromètres 3 axes et magnétomètres 3 axes) et cadencé à 60 Hz (Figure 4.4, Annexe A.1 Figure A.4). Cette combinaison permet notamment de capturer et de restituer l'intégralité des mouvements du corps. L'ordinateur exécutant l'application est équipé d'un processeur Intel Core I7-6700HQ @2,60 GHz et d'une carte graphique Nvidia GeForce GTX 1070. Ce dernier est installé sur une plate-forme située au plafond de la salle d'expérimentation, permettant ainsi de profiter d'un espace de navigation d'approximativement 35m². L'espace se trouvant limité par la longueur du câble de casque de réalité virtuelle, placer l'ordinateur au centre de la zone plutôt qu'en périphérie permet potentiellement de doubler l'espace accessible.

4.3.3 Participants

31 participants ont été recrutés pour notre expérimentation. Trois d'entre eux ont été écartés de nos résultats à cause de problèmes de calibration nécessitant l'interruption de l'expérimentation. Par conséquent, 28 individus masculins âgés de 20 à 26 ans ($M = 22,46$; $SD = 1,53$) ont été retenus. Chaque participant présente une vision correcte ou corrigée avec des lunettes de vue compatibles avec le port du casque HTC Vive. Tous les participants ont utilisé *a minima* une fois un système de réalité virtuelle immersif. Comme évoqué en introduction, ce choix délibéré, bien que pouvant sembler limitant pour la portée et la généralisation de nos résultats, nous semble raisonnable dans la mesure où nous considérons qu'à l'avenir la



FIGURE 4.4 – Utilisateur équipé du matériel requis pour l’expérimentation : casque de réalité virtuelle HTC Vive et combinaison de capture de mouvement Perception Neuron.

majorité de la population aura accès à ce type de technologie. Par ailleurs, tous les participants possèdent une expérience du jeu vidéo, notamment des jeux ayant recours aux points de vue à la première et à la troisième personne. Ainsi, les antécédents similaires du panel recruté pour cette étude permettent d’assurer le contrôle des variables extérieures pouvant affecter l’expérience.

4.3.4 Procédure

En premier lieu, chaque participant complète un formulaire de consentement, ainsi que le questionnaire de pré-passation permettant le recueil des informations démographiques et de celles relatives à leur expérience de la réalité virtuelle et des jeux vidéos. Dans un second temps, l’utilisateur est équipé du matériel requis pour l’expérimentation et reçoit les instructions nécessaires. Une fois celui-ci équipé et calibré, l’expérimentateur initialise l’application et lance le scénario constitué d’une phase d’accommodation, d’une première tâche de perception et de déviation de projectiles et d’une seconde tâche de navigation et d’interaction avec des terminaux. Chaque participant effectue deux passations, une par modalité de point de vue (1P/3P) suivant un plan expérimental intra-sujet. L’ordre de passation des conditions est contrebalancé afin de limiter le phénomène d’apprentissage. Chaque expérimentation dure approximativement 60 minutes, dont 15 minutes d’immersion dans l’environnement virtuel. À l’issue de chacune des phases d’immersion, les participants complètent le questionnaire post-passation. Au terme de l’expérimentation, un entretien semi-directif est mené.

Accommodation

La phase d'accommodation permet au participant d'appréhender le fonctionnement de l'application et de s'habituer à la modalité de point de vue utilisée. Cette phase permet également à l'utilisateur de naviguer dans l'environnement virtuel afin d'ajuster sa perception des distances, souvent compressée en environnement immersif [Knapp et Loomis, 2004]. Ce biais de perception peut être en partie rectifié par la mise en place de déplacements avec pour objectif l'atteinte d'une cible [Kelly *et al.*, 2014], ici matérialisé par un drone (Figure 4.5a, Annexe A.1 Figure A.2). À l'initialisation de cette phase d'accommodation, celui-ci vient accoster l'utilisateur pour lui donner les consignes nécessaires au déroulement de l'expérience. Il se déplace à cinq reprises dans la pièce et demande au participant de rejoindre sa position, permettant à ce dernier de s'appropriier l'espace. Pour terminer, l'utilisateur se positionne sur la plate-forme centrale afin d'accéder à l'arène où se déroulent les tâches du scénario.

Tâche 1 : perception et déviation de projectiles.

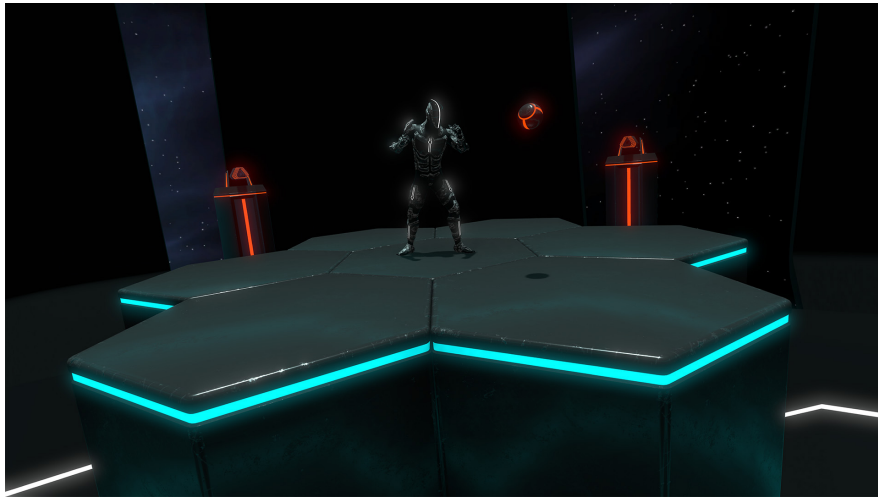
La première tâche proposée permet d'évaluer la perception que le participant a de l'environnement ainsi que sa capacité à interagir avec des éléments en mouvements. Il doit ainsi dévier une série de 30 projectiles (20 cm de diamètre) provenant de lanceurs positionnés aux six angles de l'arène hexagonale (Figure 4.5b, Annexe A.1 Figure A.3a). 15 sphères par minute sont lancées à une fréquence constante d'une sphère toutes les 4 secondes. La sélection du lanceur est définie dynamiquement en fonction de l'orientation du participant afin que soient émis 5 projectiles pour chacune des 6 directions possibles. Lors de cette phase, l'utilisateur est situé sur une plate-forme virtuelle d'environ 2,5 m². Comme mentionné préalablement, les effets sonores de l'application ne sont pas spatialisés lors de cette phase, la faculté de perception visuelle évaluée pouvant être biaisée par la perception auditive.

Tâche 2 : navigation et interaction avec des terminaux.

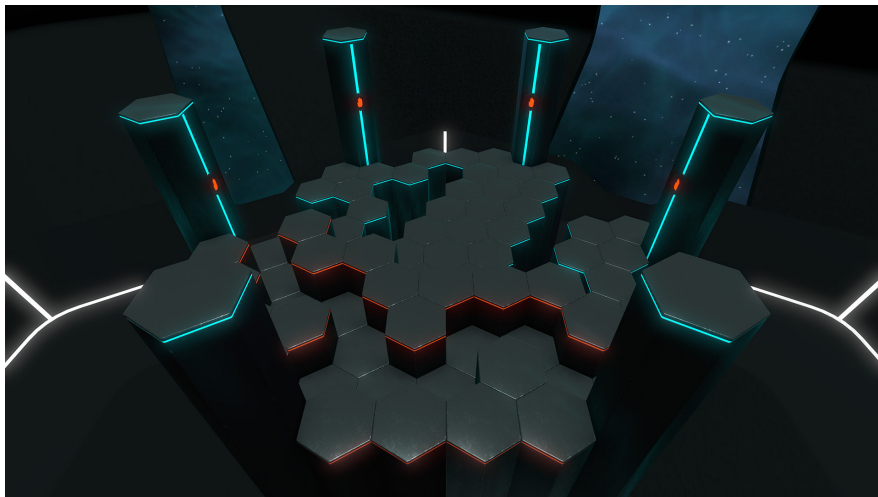
La seconde tâche permet d'évaluer la capacité de navigation et l'efficacité du participant lors des phases d'interactions de précision. Les plates-formes constituant l'environnement virtuel se modulent dynamiquement afin de définir le parcours à emprunter (Figure 4.5c, Annexe A.1 Figure A.3b). L'utilisateur doit atteindre la fin des trois premières sections du parcours sans tomber des plates-formes. Les trois sections suivants disposent de rebords avec lesquels le participant doit éviter d'entrer en collision. L'accès à chaque nouvelle section est déclenché via une interaction de précision consistant à placer la main de l'avatar sur l'empreinte dédiée d'un terminal situé à la fin de chacune des parties du parcours.



(a) Phase d'accommodation.



(b) Tâche 1 : perception et déviation de projectiles.



(c) Tâche 2 : navigation et interaction avec des terminaux.

FIGURE 4.5 – Illustration des trois phases de l'expérimentation 1.

4.3.5 Mesures

Nos mesures se basent sur trois types de données. Comme présenté lors du chapitre 3 dédié à notre méthodologie, les sentiments de présence physique et d’incarnation sont évalués via le questionnaire (Tableau 4.1) et l’entretien post-passation. Les performances sont quant à elles mesurées via le recueil de données objectives enregistrées par l’application. Par ailleurs, le ressenti subjectif des participants concernant leurs performances face aux différentes modalités de point de vue est également recueilli par le questionnaire, ainsi que lors de l’entretien, afin d’être confronté aux données objectives.

Les données objectives relatives aux performances des utilisateurs lors des phases de perception, d’interaction et de navigation sont collectées via l’application dans un fichier CSV². Ce fichier regroupe les informations suivantes :

- **Provenance et nombre de sphères déviées (SD)** lors de la première tâche du scénario (Figure 4.5b). Chaque déviation est comptabilisée si le participant parvient à repousser le projectile avec ses mains ou ses bras.
- **Délai de perception moyen des projectiles (DP)** (Figure 4.5b). Cette information est essentielle afin d’analyser la capacité de perception des utilisateurs. Le délai correspond à la durée entre le lancement des sphères et leur détection par les participants. Cependant, il est à noter qu’en l’absence de dispositif oculométrique, un projectile est considéré comme perçu dès lors qu’il entre dans le champ de vision du casque de réalité virtuelle.
- **Durée de navigation pour chacun des tronçons (DN)** de la seconde tâche du scénario (Figure 4.5c). Ce temps correspond à la durée entre l’activation du tronçon parcourue et l’activation du suivant.
- **Durée d’interaction avec les terminaux (DI)** (Figure 4.5c). Ce délai d’interaction correspond à la durée entre l’accès à la zone d’interaction et l’activation effective du terminal.

Le questionnaire post-passation, complété par les participants après chaque phase d’immersion, recueille le ressenti subjectif concernant les sentiments de présence physique et d’incarnation, ainsi que l’aisance avec les différents points de vue. Il se compose d’items à échelles sémantiques à cinq points répartis en trois dimensions (Tableau 4.1) :

2. Le format CSV (*Comma-Separated Values*) est un format informatique ouvert représentant des données tabulaires sous forme de valeurs séparées par des virgules.

- **Présence physique**, composée de huit items ($\alpha = 0,81$) divisés en deux facteurs : **localisation environnementale (LE)**, **actions possibles (AP)**.
- **Incarnation**, composée de dix items ($\alpha = 0,84$) répartis en trois facteurs : **localisation de soi (LS)**, sentiment d'**agentivité (A)** et sentiment de **possession (P)**.
- **Point de vue (PDV)** composé de quatre items indépendants contextualisés par rapport à l'expérience proposée et permettant de cerner l'aisance des participants par rapport aux différentes conditions de point de vue lors des tâches proposées.

Le coefficient alpha de Cronbach a été calculé pour les deux premières dimensions de notre questionnaire en tenant compte des données recueillies dans l'une des deux conditions de passation de l'expérience (1P). Ainsi, la cohérence interne du questionnaire s'est révélée fiable, le coefficient α étant supérieur à 0,8 pour chaque dimension. Bien que la taille du panel recruté pour cette expérimentation ne suffise pas à vérifier la fiabilité statistique du questionnaire, celle-ci semble néanmoins satisfaisante au regard de nos premiers résultats.

Enfin, l'entretien semi-directif concluant l'expérimentation permet aux participants de s'exprimer librement sur l'expérience vécue (guide d'entretien disponible en annexe A.2). Il permet notamment de procéder à une analyse sémantique afin d'identifier les propos récurrents pouvant étayer nos résultats. Cet entretien permet également de recueillir des réflexions pertinentes pouvant porter à notre attention différents phénomènes susceptibles d'alimenter notre discussion.

4.3.6 Hypothèses

Au regard de notre revue de littérature et du protocole développé pour cette expérimentation, voici la liste des cinq hypothèses émises :

- **H1** : Le point de vue utilisé impacte les sentiments de présence (H1.1) et d'incarnation (H1.2) en environnement virtuel immersif.
- **H2** : Le point de vue à la troisième personne permet aux utilisateurs d'améliorer leur conscience de l'espace et la perception de l'environnement entourant leur avatar.
- **H3** : Le point de vue à la troisième personne facilite les interactions avec des éléments mobiles grâce à une meilleure perception de leurs trajectoires.
- **H4** : Le point de vue impacte l'efficacité de la navigation.
- **H5** : Le point de vue à la première personne améliore l'efficacité des interactions de précision grâce à une meilleure perception des bras et des jambes des avatars des utilisateurs.

4.4 Résultats

Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour vérifier la normalité de la distribution des réponses du questionnaire (Tableau 4.1), ainsi que des données objectives recueillies par l'application. Les variables ne suivant pas une distribution normale, nous avons recours à des tests non paramétriques pour analyser l'ensemble de nos résultats. Ainsi, le test de Wilcoxon est utilisé afin de comparer les réponses aux questions selon les deux modalités de point de vue (1P/3P). Les résultats sont considérés comme significatif quand $p < 0,05$. De plus, le test de Mann-Whitney n'a révélé aucun effet d'ordre pour les quatre mesures de performance objectives considérées, confirmant ainsi l'efficacité du contrebalancement de l'ordre de passation des conditions expérimentales. La première partie de l'analyse concerne les notions de présence et d'incarnation évaluées par les deux premières dimensions du questionnaire (Tableaux 4.1, 4.2) et les entretiens post-passation.

4.4.1 Présence physique

L'évaluation des questions relatives à la présence physique du facteur localisation environnementale (LE-Q1 - LE-Q4) ne révèle pas de différences significatives entre les deux modalités de point de vue, à l'exception de l'item LE-Q1 ($Z = 2,995$; $p = 0,003$) en faveur de la condition 1P. Le facteur actions possibles (AP-Q1 - AP-Q4) ne révèle également qu'une différence significative pour le second item AP-Q2 ($Z = 2,639$; $p = 0,008$) en faveur de la condition 1P. D'après nos résultats, l'impact du point de vue sur la présence physique s'avère très limité, ce qui invalide l'hypothèse H1.1. Toutefois, les valeurs quasi maximales pour les deux points de vue semblent indiquer que chaque modalité permet l'induction d'un sentiment élevé de présence physique (Figure 4.6).

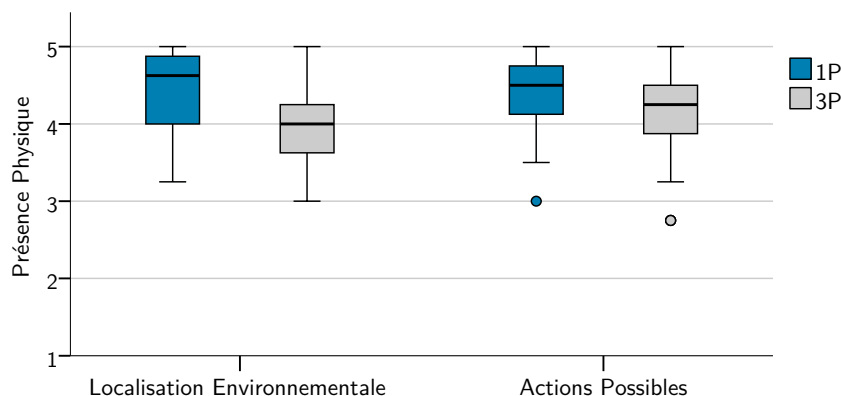


FIGURE 4.6 – Moyennes des facteurs LE et AP de la dimension présence physique.

4.4.2 Incarnation

L'évaluation des questions relatives au sentiment incarnation du facteur localisation de soi (LS-Q1 - LS-Q2) est significativement supérieure dans la condition 1P : LS-Q1 ($Z = 3,274$; $p = 0,001$), LS-Q2 ($Z = 3,849$; $p < 0,001$). Concernant le facteur agentivité, l'item A-Q1 ne présente pas de différence significative. En revanche, nous constatons que les résultats du second item A-Q2 sont supérieurs dans la condition 3P, quand ceux des items 3 et 4 (A-Q3, A-Q4) sont supérieurs dans la condition 1P. Cependant, seule la différence observée à la question 3 s'avère significative en faveur de la condition 1P ($Z = 2,430$; $p = 0,015$). Enfin, l'évaluation des questions du facteur possession (P-Q1 - P-Q4) démontre que la condition 1P est significativement supérieure à la condition 3P pour les quatre questions considérées : P-Q1 ($Z = 2,898$; $p = 0,004$), P-Q2 ($Z = 3,970$; $p < 0,001$), P-Q3 ($Z = 2,631$; $p = 0,009$), P-Q4 ($Z = 2,555$; $p = 0,011$). L'analyse des résultats concernant la dimension incarnation démontre que la condition 1P influence positivement et significativement les facteurs localisation de soi et possession, confirmant ainsi l'hypothèse H1.2. En revanche, le facteur agentivité ne semble pas être impacté par la condition de point de vue, les résultats observés étant élevés sous les deux modalités (Figure 4.7).

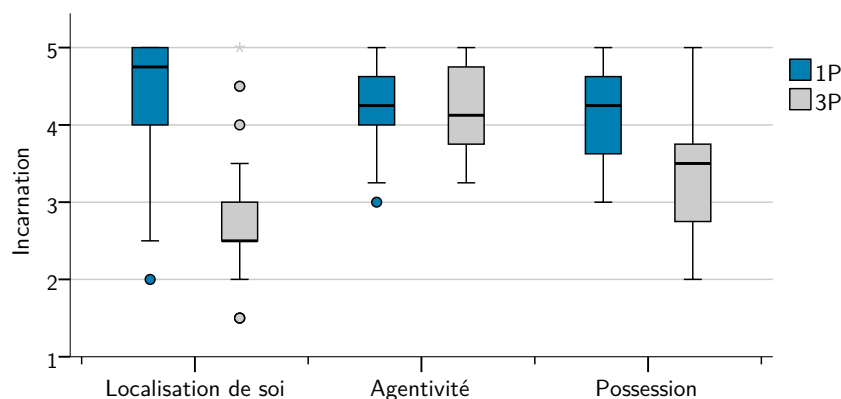


FIGURE 4.7 – Moyennes des facteurs LS, A et P de la dimension incarnation.

4.4.3 Performances

La seconde partie de l'analyse concerne les performances des participants en matière de perception, d'interaction et de navigation. Les données objectives collectées sont issues de l'application, les données subjectives sont quant à elles issues du questionnaire post-passation et des entretiens semi-directifs.

Tâche 1 : perception et déviation de projectiles

La dimension **point de vue** du questionnaire post-passation se compose de quatre questions (PDV-Q1 - PDV-Q4) évaluant l'aisance de chaque participant avec les différentes conditions de point de vue. Plus les résultats sont élevés sur l'échelle à cinq points, plus les tâches leur ont semblé aisées (Figure 4.8).

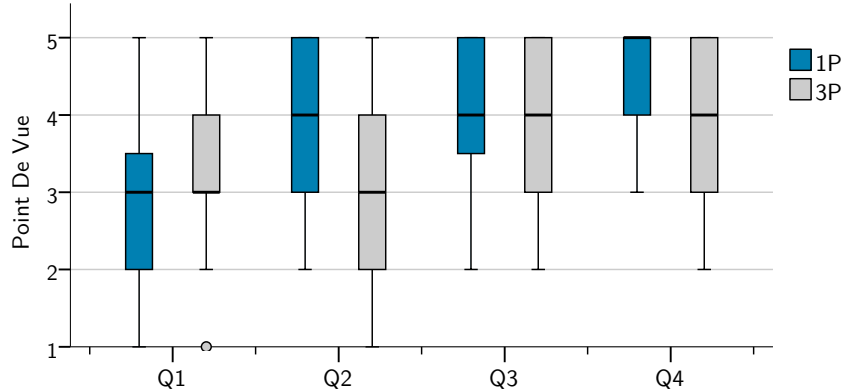


FIGURE 4.8 – Scores des items du facteur point de vue : perception (Q1), interactions (Q2), navigation (Q3), interactions précises (Q4).

L'évaluation du premier item PDV-Q1 portant sur la capacité de perception des projectiles ne révèle pas de différence significative entre les différentes modalités de point de vue. On observe cependant une tendance en faveur de la condition 3P. De plus, lors de l'entretien, la majorité des participants ($N = 23$) disent avoir trouvé la condition 3P plus adaptée pour la perception des projectiles. Cette tendance se confirme par les données objectives relatives aux performances, le délai de perception moyen étant significativement plus élevé dans la condition 1P ($Z = 4,541$; $p < 0,001$). Le temps de perception est en moyenne de 1,37 s ($\sigma = 0,119$) dans la condition 1P contre 0,72 s ($\sigma = 0,124$) dans la condition 3P (Figure 4.9). La tendance identifiée dans le questionnaire en faveur du point de vue à la troisième ainsi que les propos recueillis lors des entretiens et la nette différence de temps de perception démontrent la validité de l'hypothèse H2.

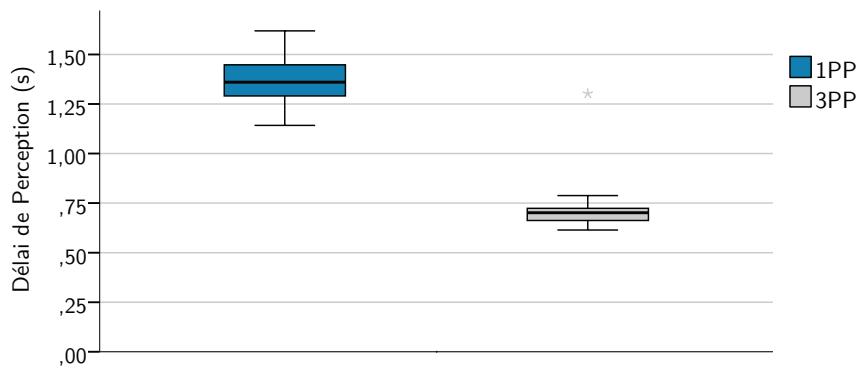


FIGURE 4.9 – Temps de perception moyen des projectiles.

Les résultats du second item PDV-Q2 portant sur les interactions avec des éléments mobiles (déviations des projectiles) sont significativement supérieurs dans la condition 1P ($Z = 2,821$; $p = 0,005$). En revanche, le nombre de projectiles déviés ne présente pas de différence significative entre les deux conditions. Les participants ont en moyenne dévié 24,39 ($\sigma = 3,107$) projectiles dans la condition 1P contre 23,19 ($\sigma = 3,259$) dans la condition 3P (Figure 4.10). Les résultats ne permettent donc pas de trancher concernant l'hypothèse H3. En effet, même si les résultats des questionnaires retranscrivent une plus grande aisance des participants avec la condition 1P lors de la déviation des projectiles, les résultats objectifs sont non significatifs.

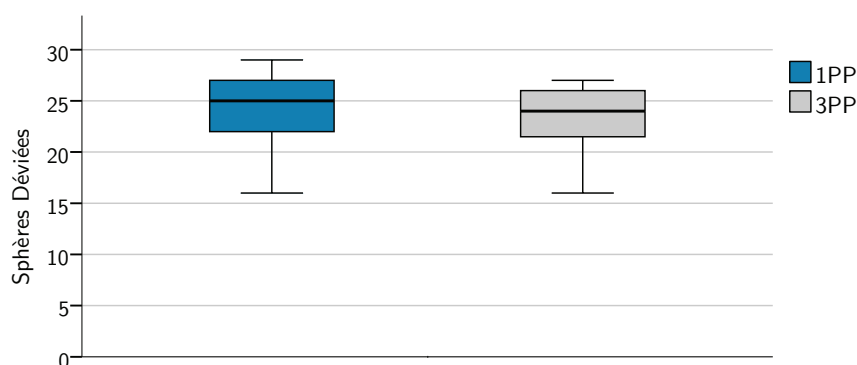


FIGURE 4.10 – Nombre moyen de sphères déviées.

Tâche 2 : navigation et interaction avec des terminaux

Concernant la navigation, les données subjectives collectées par le troisième item du questionnaire PDV-Q3 ne présentent pas de différences significatives entre les modalités de point de vue. Néanmoins, les entretiens post-passation révèlent des divergences au sein du panel, certains des participants considérant la condition 1P comme plus adaptée ($N = 16$), d'autres la condition 3P ($N = 10$). En revanche, le temps total de parcours lors de la phase sans obstacle (SO) ainsi que lors de la phase avec obstacle (O) est significativement plus élevé dans la condition 3P : SO ($Z = 2,018$; $p = 0,044$), O ($Z = 3,267$; $p < 0,001$). La durée de navigation moyenne sans obstacle étant de 46,68 s ($\sigma = 20,37$) dans la condition 1P et de 50,72 s ($\sigma = 11,96$) dans la condition 3P. La durée de navigation moyenne avec obstacles est quant à elle de 64,34 s ($\sigma = 26,33$) dans la condition 1P et de 77,56 s ($\sigma = 25,67$) dans la condition 3P (Figure 4.11). Au regard des données subjectives, nous ne sommes pas en mesure d'infirmier ou de confirmer l'hypothèse H4. Cependant, les performances objectives relatives à la durée de navigation donnent un avantage à la condition 1P.

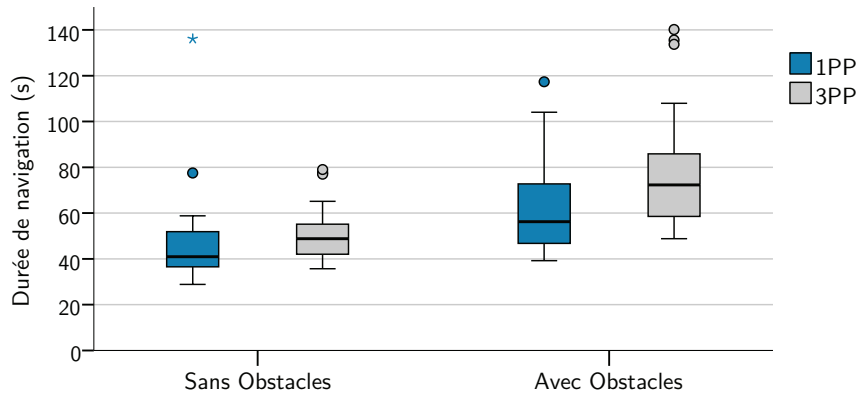


FIGURE 4.11 – Durée totale des phases de navigation avec et sans obstacles.

L'évaluation de l'item PDV-Q4 portant sur les interactions de précision est significativement supérieure dans la condition 1P ($Z = 2,828$; $p = 0,005$). Ce constat est corroboré par le délai d'interaction moyen significativement plus élevé dans la condition 3P ($Z = 3,796$; $p < 0,001$). Ce délai est mesuré à 5,12 s ($\sigma = 1,56$) dans la condition 1P et 6,56 s ($\sigma = 1,33$) dans la condition 3P. Ainsi, les données subjectives et objectives corroborent l'hypothèse H5 et démontrent que les interactions de précision sont conduites de manière plus efficace dans la condition 1P (Figure 4.12).

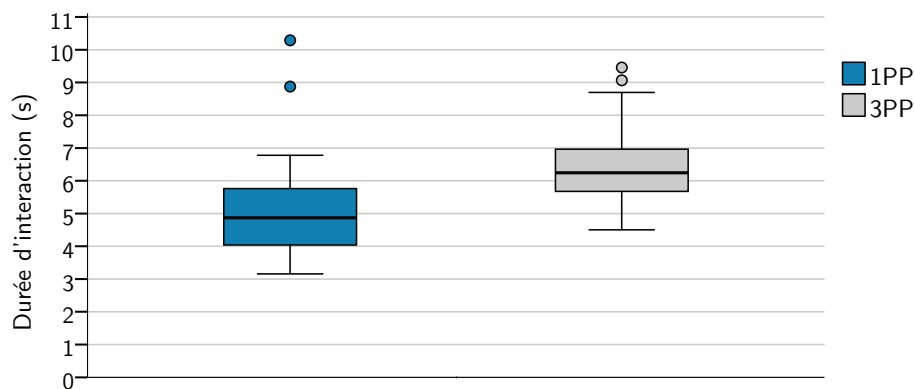


FIGURE 4.12 – Durée d'interaction moyenne avec les terminaux.

TABLEAU 4.1 – Questionnaire post-expérimentation composé de trois dimensions : présence physique (Localisation Environnementale - **LE**, Actions Possibles - **AP**), Incarnation (Localisation de Soi - **LS**, Agentivité - **A**, Possession - **P**), Point de vue(**PDV**). La mention (r) indique les items aux scores inversés.

ID	Questions
LE-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que vous étiez « réellement là » au sein de l'environnement virtuel ?
LE-Q2	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que les objets de l'environnement virtuel vous entouraient ?
LE-Q3	Dans quelle mesure vous a-t-il semblé que votre position réelle avait changé pour devenir celle de l'environnement virtuel ?
LE-Q4	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression d'être physiquement présent dans l'environnement virtuel ?
AP-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que vous pouviez agir dans l'environnement virtuel ?
AP-Q2	Dans quelle mesure avez-vous eu la sensation de pouvoir vous déplacer parmi les éléments de l'environnement virtuel ?
AP-Q3	Dans quelle mesure les éléments de l'environnement virtuel vous ont donné le sentiment que vous pouviez interagir avec eux ?
AP-Q4	Dans quelle mesure vous a-t-il semblé que vous pouviez faire ce que vous souhaitiez dans l'environnement virtuel ?
LS-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression d'être situé dans le corps virtuel ?
LS-Q2 (r)	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression d'être situé à une certaine distance du corps virtuel, comme si vous regardiez quelqu'un d'autre ?
A-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le corps virtuel bougeait comme vous le vouliez, comme s'il obéissait à votre volonté ?
A-Q2	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le corps virtuel réagissait de la même manière que votre corps ?
A-Q3	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression de pouvoir interagir avec l'environnement de la manière que vous vouliez ?
A-Q4	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression de contrôler le corps virtuel comme s'il s'agissait de votre corps réel ?
P-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le corps virtuel était votre corps ?
P-Q2 (r)	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le corps virtuel était quelqu'un d'autre ?
P-Q3	Quand quelque chose affectait le corps virtuel, avez-vous eu l'impression que votre corps réel était également affecté ?
P-Q4	Dans quelle mesure avez-vous oublié votre corps réel au profit du corps virtuel ?
PDV-Q1	Dans quelle mesure la perception des sphères vous a-t-elle paru aisée ?
PDV-Q2	Dans quelle mesure la déviation des sphères vous a-t-elle paru aisée ?
PDV-Q3	Dans quelle mesure les déplacements lors de la phase de parcours sur les plate-formes vous ont-ils semblé aisés ?
PDV-Q4	Dans quelle mesure les interactions avec les bornes lors de la phase de parcours vous ont-elles semblé aisées ?

TABLEAU 4.2 – Résumé statistique des réponses au questionnaire post-expérimentation présentant chaque facteur des trois dimensions : présence physique (Localisation Environnementale - **LE**, Actions Possibles - **AP**), Incarnation (Localisation de Soi - **LS**, Agentivité - **A**, Possession - **P**), Point de Vue (**PDV**). Les moyennes et les écarts types sont reportés pour chaque condition (1P/3P). Le seuil de significativité est reporté uniquement quand $p < 0,05$. La mention (r) indique les items aux scores inversés.

ID	1P		3P		p
	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	
LE-Q1	4,36	0,621	3,82	0,670	0,003
LE-Q2	4,50	0,638	4,11	0,737	
LE-Q3	4,57	0,634	4,32	0,863	
LE-Q4	4,21	0,833	3,82	0,819	
AP-Q1	4,36	0,870	4,25	0,752	
AP-Q2	4,57	0,573	4,04	0,881	0,008
AP-Q3	4,39	0,685	4,07	0,766	
AP-Q4	4,21	0,686	3,86	0,803	
LS-Q1	4,29	0,897	3,14	1,008	0,001
LS-Q2 (r)	4,64	0,951	2,54	1,261	< 0,001
A-Q1	4,39	0,629	4,39	0,685	
A-Q2	4,18	0,612	4,46	0,508	
A-Q3	4,32	0,723	3,79	0,876	0,015
A-Q4	4,18	0,819	4,04	0,793	
P-Q1	4,14	0,756	3,32	1,056	0,004
P-Q2 (r)	4,79	0,499	3,39	1,197	< 0,001
P-Q3	3,46	1,105	2,89	1,100	0,009
P-Q4	4,07	0,940	3,61	0,956	0,011
PDV-Q1	2,86	1,113	3,29	0,937	
PDV-Q2	3,93	0,900	3,04	1,105	0,005
PDV-Q3	4,07	0,858	3,86	1,008	
PDV-Q4	4,61	0,567	3,93	1,052	0,005

4.5 Discussion

4.5.1 Impact du point de vue sur la présence et l'incarnation

Les résultats de notre expérimentation concernant l'impact du point de vue sur la notion de présence physique ne permettent pas d'identifier un avantage en faveur d'une de nos conditions. En effet, si l'on observe une légère tendance en faveur du point de vue à la première personne pour les deux facteurs constituant cette dimension (localisation environnementale et actions possibles), la majorité des résultats s'avèrent non significatifs. Cependant, il est intéressant de constater que, dans les deux conditions, notre système semble induire un sentiment de présence physique très élevé. Dans l'absolu, les résultats moyens observés pour chacun des facteurs présentent des valeurs proches de la maximale sur notre échelle (Figure 4.6). Ces constats semblent démontrer la possibilité pour un utilisateur d'éprouver le sentiment « d'être là » au sein de l'environnement virtuel, et ce indépendamment de la condition de point de vue utilisée.

Nos résultats concernant la notion d'incarnation présentent quant à eux des différences significatives pour les deux facteurs constituant cette dimension. En effet, le point de vue à la première personne s'avère avoir un impact favorable et supérieur au point de vue à la troisième personne sur la localisation de soi (volume dans l'espace où l'utilisateur se sent localisé) et sur le sentiment possession (attribution du corps à soi). Lors de notre revue de littérature, nous avons souligné la divergence des études investiguant ces notions. Nos résultats corroborent ici les observations précédentes de Slater *et al.* [2010] et Maselli et Slater [2013]. En revanche, ils sont en contraste avec l'étude de Debarba *et al.* [2015] où la condition du point de vue n'induit pas de différences significatives dans les évaluations subjectives de la localisation de soi et du sentiment de possession, alors que nous observons que le point de vue à la première personne les favorise tous les deux. Cette différence pourrait être liée à la sensibilité des mesures, leur questionnaire n'utilisant qu'un item par facteur, le nôtre en comprenant plusieurs pour l'évaluation de chacun d'entre eux.

Bien qu'objectivement supérieur en première personne, le sentiment de possession demeure néanmoins relativement important en troisième personne. Comme illustré par les travaux antérieurs de Kokkinara et Slater [2014], la synchronisation visuomotrice induite par la restitution des mouvements permet une attribution importante du corps de l'avatar, indépendamment de la condition de point de vue. Nous avons également constaté lors des entretiens l'hésitation de certains participants face aux questions concernant la localisation de soi. En

effet, un état de bilocalisation a été évoqué à plusieurs reprises, justifiant potentiellement la présence de certaines valeurs exceptionnelles dans les résultats observés (Figure 4.7) :

J'avais l'impression de regarder un film et d'en être l'acteur.

Ce n'est pas la même perception. À la troisième personne on a plus l'impression de diriger un personnage, mais on reste quand même complètement dedans, car on voit très bien que l'on bouge et que le personnage répond bien à ce que l'on fait.

Le sentiment d'agentivité quant à lui ne présente pas de différences significatives entre les différents points de vue. Ce sentiment s'avère très élevé pour les deux modalités. Ce constat démontre que, malgré la différence relative de possession induite, l'utilisation du point de vue à la troisième personne s'avère compatible avec la conception d'expériences induisant un sentiment d'incarnation en environnement virtuel.

4.5.2 Impact du point de vue sur les performances

Notre expérimentation vise également à évaluer l'impact du point de vue sur les performances des participants en matière de perception, de navigation et d'interaction. À cet égard, les résultats quantitatifs objectifs enregistrés par l'application démontrent une amélioration de la perception de l'espace grâce à l'utilisation du point de vue à la troisième personne. Plus des deux tiers du panel expliquent ce gain par la largeur du champ visuel permettant de percevoir rapidement les éléments provenant en périphérie de leur avatar. Ce constat corrobore l'étude de Debarba *et al.* [2015] et confirme notre hypothèse concernant le potentiel de perception octroyé par le point de vue à la troisième personne. Peut-être qu'une augmentation du champ de vision des futurs casques de réalité virtuelle pourrait réduire les différences observées entre les deux conditions de point de vue, mais sans permettre pour autant aux utilisateurs de percevoir l'ensemble de leur avatar agissant au sein de l'environnement virtuel.

Concernant les interactions avec des éléments mobiles, notre expérimentation ne permet pas de trancher en faveur d'une modalité de point de vue. En effet, bien que la perception des projectiles soit accrue avec le point de vue à la troisième personne, le nombre de sphères déviées reste sensiblement identique. Cependant, les données subjectives des questionnaires et des entretiens démontrent qu'une majorité de participants considère la déviation comme étant plus aisée à la première personne. Ici les problèmes évoqués concernent notamment la perception des distances qui resterait moins précise malgré la phase d'habituation intégrée

lors de la phase initiale du scénario. L'occlusion générée par le corps virtuel de l'avatar s'avère également problématique pour la perception des projectiles provenant face à l'utilisateur. Un phénomène similaire étant par ailleurs observé lors de la seconde tâche. En effet, nos résultats objectifs et subjectifs démontrent une meilleure efficacité des participants lors de l'exécution d'interactions de précision via le point de vue à la première personne (Figure 4.12).

En matière de navigation, les durées de parcours s'avèrent être en moyenne inférieures en première personne (Figure 4.11). En revanche, il est intéressant de constater que si la première personne semble être une transposition plus naturelle de notre point de vue au sein de l'environnement virtuel, nous avons également constaté chez certains participants une appropriation remarquable des potentialités offertes par le point de vue à la troisième personne :

À la troisième personne, dans ma tête, j'étais la caméra, [...] je vais essayer de la placer où je peux pour améliorer la vision, pour voir où je mets mes pieds et mes mains...

En effet, le contrôle du point de vue à la troisième personne, réalisé grâce aux mouvements de la tête de l'utilisateur, permet de positionner la caméra au-dessus du personnage afin de percevoir l'environnement à proximité de l'avatar. Huit participants ont eu recours à cette stratégie lors de la phase de navigation avec obstacle. Un tiers du panel souligne toutefois la nécessité de la phase d'accommodation permettant une habitude essentielle au bon déroulement de l'expérimentation :

Il y a vraiment une progression du début jusqu'à la fin de l'expérience [...]. Comme un outil, on commence à le maîtriser et on voit tout ce que l'on peut faire avec (3P).

Enfin, pour garantir l'utilisabilité du point de vue à la troisième personne tel qu'intégré dans notre application, nous avons interrogé les participants lors des entretiens sur les malaises potentiellement induits. En effet, la décorrélation entre la vision et le système vestibulaire de l'utilisateur peut potentiellement générer une forme de cinétose. La totalité du panel affirme cependant ne pas avoir ressenti de gêne lors de l'expérience. Cette information s'avère être essentielle concernant la viabilité des travaux entrepris ici et démontre l'utilisabilité des deux points de vue en environnement virtuel immersif.

4.5.3 Limites de l'étude

Suite aux constats réalisés lors de notre étude, nous avons procédé à quelques ajustements concernant l'intégration du point de vue à la troisième personne en environnement immersif afin d'en tirer son plein potentiel. Nous avons notamment implémenté la mise en transparence des éléments venant s'interposer entre la caméra et l'avatar en lieu et place de l'adaptation dynamique de la distance de celle-ci. Bien que la conception de l'environnement de notre expérimentation ne confronte que rarement les utilisateurs à ce phénomène, cette optimisation semble néanmoins nécessaire afin de proposer une expérience optimale. En effet, si l'intégration proposée initialement s'avère régulièrement employée dans le domaine du jeu vidéo, certains éléments se doivent d'être repensés pour la réalité virtuelle.

Chapitre 5

Expérimentation 2.1 : impact de la fidélité des avatars sur l'attractivité perçue

Sommaire

5.1	Résumé	116
5.2	Présentation de l'étude	117
5.3	Matériel et méthodes	118
5.3.1	Application	118
5.3.2	Équipement	119
5.3.3	Participants	119
5.3.4	Procédure	119
5.3.5	Mesures	120
5.3.6	Hypothèses	120
5.4	Résultats	121
5.4.1	Attractivité des avatars	121
5.4.2	Estime de soi et sélection de personnages	122
5.5	Discussion	124
5.5.1	Introduction de la seconde phase expérimentale	125

5.1 Résumé

Ce chapitre présente la première étude de notre série d'expérimentations étudiant l'impact de la fidélité visuelle des avatars sur l'expérience utilisateur, notamment sur le sentiment d'incarnation en environnement virtuel immersif. Cette première expérimentation demande aux participants d'évaluer trois personnages présentant différents niveaux de fidélité visuelle : un robot, une combinaison et un doppelgänger. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de la véracité (degré de similitude entre les utilisateurs et les avatars) et de l'estime de soi sur l'attractivité perçue des avatars. Nos résultats démontrent l'impact positif de la véracité sur l'évaluation de l'attractivité et suggèrent une corrélation entre l'estime de soi et la sélection d'avatars.



FIGURE 5.1 – Illustration du contenu de l'application de réalité virtuelle utilisée lors de l'expérimentation 2.1 : impact de la fidélité visuelle des avatars et de l'estime de soi sur l'attractivité perçue et la sélection de personnages.

5.2 Présentation de l'étude

Cette étude constitue la première phase de notre série d'expérimentations portant sur l'impact de la fidélité visuelle des avatars sur le sentiment d'incarnation [Kiltner *et al.*, 2012] et ses implications comportementales induites par l'effet Proteus [Yee et Bailenson, 2007]. Comme évoqué lors de notre revue de littérature (Section 2.5.1), les travaux de Garau [2003] permettent de classer la fidélité visuelle selon les trois critères suivants :

- **Anthropomorphisme** (*non-humanoïde* <-> *humanoïde*) : caractéristiques morphologiques du personnage virtuel.
- **Réalisme** (*stylisé* <-> *photoréaliste*) : niveau de détail du maillage et des textures.
- **Véracité** (*ne ressemble pas à l'utilisateur* <-> *ressemble à l'utilisateur*) : degré de similitude entre l'utilisateur et le personnage virtuel.

Dans ce cadre théorique, l'objectif de notre étude est d'immerger et de confronter l'utilisateur à trois personnages virtuels présentant chacun un niveau de véracité différent, tout en gardant un niveau constant d'anthropomorphisme et de réalisme. Le degré de similitude avec l'utilisateur est donc utilisé comme variable afin d'observer et d'évaluer l'impact subjectif de la véracité sur l'attractivité perçue des avatars [Fleming *et al.*, 2017; Zell *et al.*, 2015]. À l'issue de notre série d'expérimentations, nous serons en mesure d'analyser les bénéfices potentiels liés à l'observation et au contrôle de notre représentation virtuelle reconstruite en 3D (Figure 5.3) [Chagué et Charbonnier, 2015; Jo *et al.*, 2017]. Bien que des travaux antérieurs aient démontré que la confrontation à un double virtuel en environnement immersif pouvait impacter le comportement des utilisateurs [Bailenson et Segovia, 2010], peu d'études ont investigué l'impact du contrôle en temps réel (synchronisation visuomotrice) de notre propre représentation, notamment sur le sentiment d'incarnation. Dans ce contexte, les niveaux de réalisme et de véracité induits par la reconstruction 3D des utilisateurs impliquent la prise en compte du phénomène de la vallée dérangeante [Mori *et al.*, 2012]. En effet, la similitude et le niveau de réalisme peuvent potentiellement induire des réactions de répulsion envers les modèles 3D si les participants observent des incohérences sur leur représentation virtuelle [MacDorman *et al.*, 2009; Seyama et Nagayama, 2007] (Section 2.5.2).

Par ailleurs, de récents travaux mettent en évidence l'effet de l'estime de soi sur les réactions et les émotions suscitées lors de la confrontation à un double virtuel [Park, 2018]. Ces facteurs psychologiques pouvant avoir une incidence sur l'expérience procurée à l'utilisateur, la présente étude considère le niveau d'estime de soi des participants et son impact potentiel sur le processus de sélection d'avatars présentant différents niveaux de véracité.

5.3 Matériel et méthodes

5.3.1 Application

L'application utilisée pour l'expérimentation a été développée à l'aide du moteur de jeu Unity. L'environnement proposé s'inspire de la science-fiction et ancre les avatars, en particulier le robot, dans un ensemble cohérent afin d'assurer la plausibilité de la scène représentée. Les personnages, en état de stase, sont situés dans des caissons transparents au sein de l'environnement virtuel immersif (Figure 5.1). La fidélité visuelle des avatars intégrés dans l'application est classée suivant les trois niveaux de véracité suivants (Figure 5.2) :

- **Robot** (Figure 5.2a) : le niveau d'anthropomorphisme du robot permet potentiellement aux utilisateurs de projeter leur schéma corporel pour le contrôler. Cependant, sa morphologie ne leur permet pas d'imaginer qu'ils peuvent être physiquement situés « à l'intérieur » du personnage, certaines parties du robot (cou, abdomen, etc.) étant conçues pour ne pas correspondre à une morphologie humaine.
- **Combinaison** (Figure 5.2b) : la combinaison est morphologiquement congruente avec des proportions humaines, permettant potentiellement aux utilisateurs d'imaginer une projection de leur corps à l'intérieur de celle-ci.
- **Doppelgänger** (Figure 5.2c) : le doppelgänger présente également des proportions humaines, mais contrairement à la combinaison, cette représentation intègre la reconstruction 3D de la tête des participants.

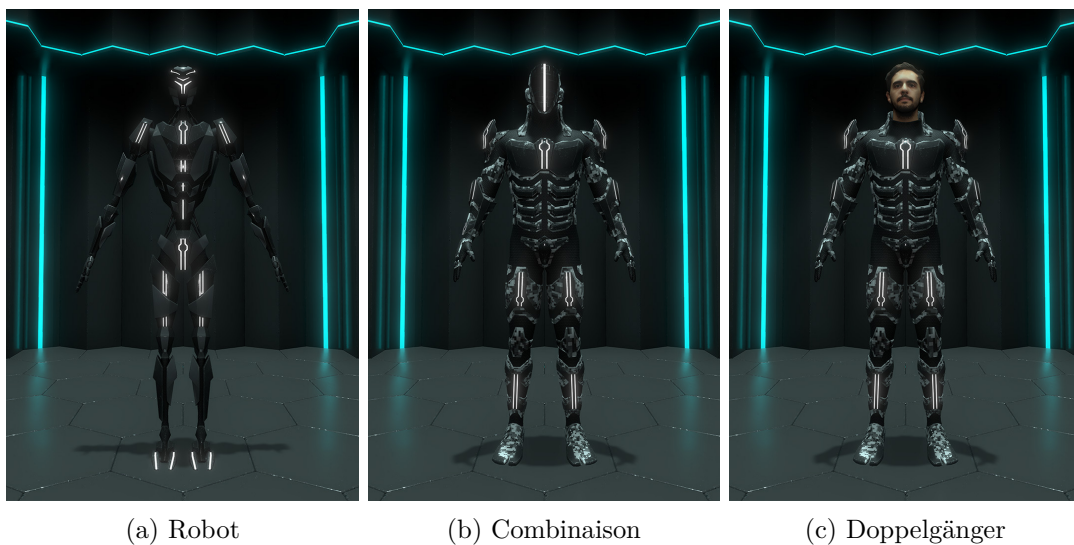


FIGURE 5.2 – Illustration des avatars intégrés dans l'application présentant trois niveaux de véracité.

5.3.2 Équipement

Les participants ont été scannés à l'aide d'un périphérique de capture Structure Sensor permettant la reconstruction 3D du buste des utilisateurs via son capteur de profondeur et grâce au placage des textures acquises simultanément avec le capteur photo (Figure 5.3). Le casque de réalité virtuelle HTC Vive est utilisé pour afficher l'environnement virtuel avec une définition de 2160 x 1200 pixels (1080 x 1200 pixels par œil), un champ de vision de 110° et un taux de rafraîchissement de 90 Hz. L'ordinateur exécutant l'application est composé d'un processeur Intel Core I7-6700HQ @ 2,60 GHz et d'une carte graphique Nvidia GeForce GTX 1070.

5.3.3 Participants

34 participants masculins, âgés de 21 à 42 ans ($M = 23,79$; $SD = 3,80$), ont été recrutés pour notre expérimentation. Chaque participant a une vision correcte ou corrigée grâce à des lunettes de vue permettant l'utilisation du casque de réalité virtuelle. À l'image du panel recruté pour notre première expérimentation, tous les participants ont utilisé *a minima* une fois un système de réalité virtuelle immersif et ont l'expérience de jeux vidéo impliquant le contrôle d'avatars (jeux de rôle, jeu de tir à la première et à la troisième personne, plateforme, etc.). Cependant, la mixité de notre panel s'est vue limitée par la technologie de reconstruction utilisée, celle-ci ne permettant pas la modélisation suffisamment qualitative de cheveux longs.

5.3.4 Procédure

Préalablement à l'expérimentation, les participants ont été invités à prendre part à une séance de scan permettant de reconstruire les bustes requis pour la modélisation des doppelgängers. Les modèles 3D ont ensuite été optimisés pour être intégrés dans l'application (Figure 5.3, Annexe B.1 Figure B.1). À cette occasion, les participants ont également complété l'échelle d'estime de soi de Rosenberg [1965] (échelle disponible en Annexe B.2). Le résultat de ce questionnaire permet d'établir un score cumulé compris entre 10 et 40, un score élevé étant synonyme d'une forte estime de soi. Chaque participant a ensuite été invité à participer à l'expérimentation quelques jours plus tard. Une fois équipés du casque de réalité virtuelle, ces derniers sont immergés dans l'application pendant une période de temps laissée à leur discrétion (entre 3 et 10 minutes) afin d'observer librement les trois avatars intégrés au sein de l'environnement virtuel. Il est à noter que la taille des avatars est calibrée à l'initialisation pour correspondre à celle des utilisateurs.



FIGURE 5.3 – Illustration de trois reconstructions de bustes (50 k polygones) et de leurs versions optimisées (2,5 k polygones) intégrées dans l'application de réalité virtuelle dédiée à l'expérimentation.

5.3.5 Mesures

À l'issue de l'expérimentation, les participants complètent un questionnaire permettant d'évaluer le niveau d'attractivité de chaque avatar via une échelle sémantique à cinq points basée sur les travaux de Zell *et al.* [2015]. Ils sont également invités à choisir l'avatar qu'ils préféreraient utiliser à l'occasion d'une prochaine expérimentation impliquant le contrôle en temps réel des trois avatars intégrés dans l'application. Le choix effectué est ensuite confronté aux scores d'estime de soi, préalablement évalués via l'échelle Rosenberg [1965], afin d'en déterminer l'impact potentiel sur le processus de sélection d'avatars présentant différents niveaux de véracité.

5.3.6 Hypothèses

Suite à nos recherches bibliographiques, nous avons posé deux hypothèses pour cette première étude portant sur l'impact de la fidélité visuelle des avatars :

- **H1** : La véracité du modèle des avatars a un impact positif sur leur niveau d'attractivité.
- **H2** : Les participants ayant une estime de soi élevée choisiront majoritairement leur double virtuel, tandis que ceux ayant une estime de soi plus faible préféreront une représentation plus abstraite¹.

1. Le terme abstrait sera utilisé pour qualifier les avatars présentant un faible niveau de véracité par absence de lien direct avec l'apparence réelle des utilisateurs.

5.4 Résultats

Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé afin de vérifier la normalité de la distribution des réponses au questionnaire post-expérimentation. Les variables ne suivant pas une distribution normale ($p < 0,05$ pour toutes les variables testées), nous avons choisi des tests non paramétriques afin d'analyser les scores d'attractivité des avatars, ainsi que l'impact du niveau d'estime de soi sur le processus de sélection de personnages. Les résultats sont considérés comme significatifs lorsque $p < 0,05$. La correction de Bonferroni a été utilisée pour ajuster la valeur alpha des comparaisons *post-hoc* par paires.

Le tableau 5.1 présente un résumé des statistiques descriptives concernant l'évaluation des niveaux d'attractivité des avatars (Figure 5.4) et leur fréquence de sélection (Figure 5.6).

TABLEAU 5.1 – Résumé des statistiques descriptives des scores d'attractivité des avatars et de leur fréquence de sélection.

Avatar	Attractivité	Fréquence
Robot	$\bar{x} = 3,38$ ($\sigma = 0,922$)	3 (9%)
Combinaison	$\bar{x} = 3,79$ ($\sigma = 0,770$)	12 (35%)
Doppelgänger	$\bar{x} = 4,09$ ($\sigma = 1,026$)	19 (56%)

5.4.1 Attractivité des avatars

Les résultats du test de Friedman ont indiqué une différence significative entre les scores d'attractivité des trois conditions de véracité (robot, costume et double) (χ^2 (2, $N = 34$) = 11,372; $p = 0,003$). Le double virtuel présente le même score médian que la combinaison ($Md = 4$) et un score supérieur à celui du robot ($Md = 3,5$). Ces résultats démontrent l'impact de la véracité sur l'évaluation de l'attractivité des avatars, confirmant la validité de notre première hypothèse (H.1).

Les tests *post-hoc* de Wilcoxon ont révélé une différence significative dans les scores d'attractivité des avatars entre le robot ($Md = 3,5$) et celui le double virtuel ($Md = 4$) ($Z = 2,453$; $p = 0,014$). De plus, on observe une forte tendance entre les groupes ayant choisi le robot et la combinaison ($Z = 2,197$; $p = 0,028$). Toutefois, ce résultat ne peut être considéré comme statistiquement significatif en raison de la correction de Bonferroni appliquée afin de limiter l'erreur de type 1 lors des tests *post-hoc*.

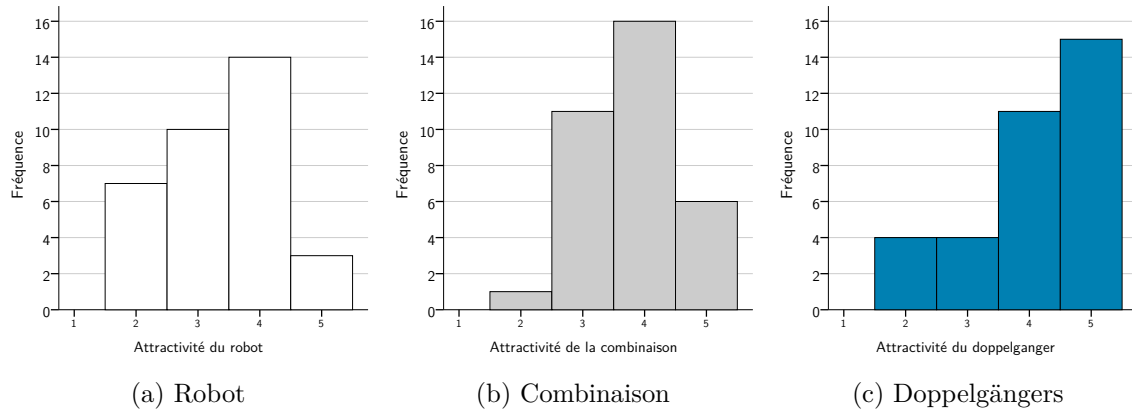


FIGURE 5.4 – Distribution des scores d'attractivité des avatars.

5.4.2 Estime de soi et sélection de personnages

Les scores d'estime de soi, mesurés préalablement à l'expérience, varient de 19 à 40 ($\bar{x} = 31,09$; $\sigma = 4,808$), un score élevé étant synonyme d'une forte confiance en soi. Ainsi, notre panel présente une grande variabilité des niveaux d'estime de soi, certains participants ayant un score plus de deux fois supérieur à d'autres (Figure 5.5).

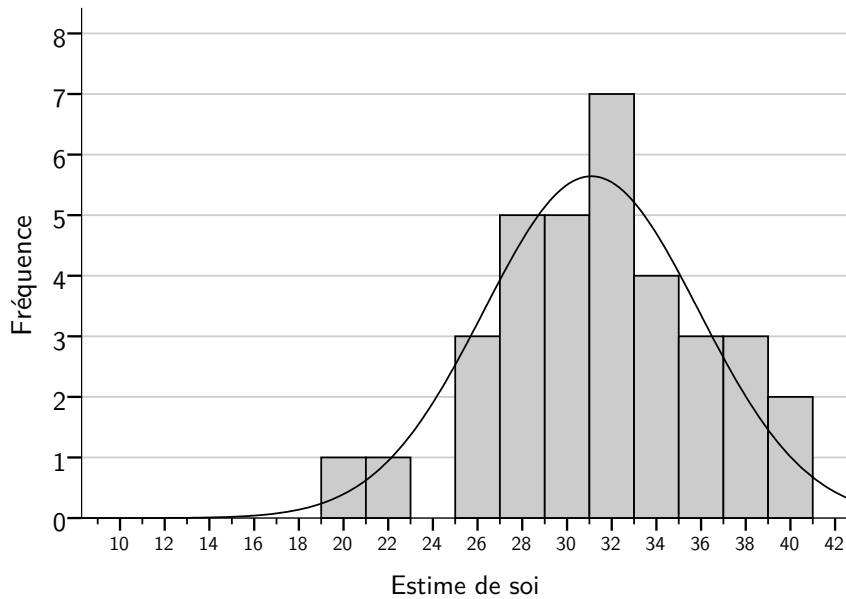


FIGURE 5.5 – Distribution des niveaux d'estime de soi des participants.

Un test de Kruskal-Wallis a révélé une différence significative des scores d'estime de soi entre les groupes de participants ayant choisi un avatar différent (Robot : $N = 3$, Combinaison : $N = 12$, Doppelgänger : $N = 19$) ($\chi^2(2, N = 34) = 6,734$; $p = 0,034$). Le groupe doppelgänger a enregistré le même score médian que le groupe combinaison ($Md = 32$) et un score plus élevé que le groupe robot ($Md = 25$). Par conséquent, notre seconde hypothèse (H2) semble valide.

Les tests *post-hoc* de Mann-Whitney ont révélé une différence significative dans les niveaux d'estime de soi entre les participants ayant choisi le robot ($Md = 25$) et ceux ayant choisi le doppelgänger ($Md = 32$) ($U = 1,5$; $Z = 2,59$; $p = 0,01$). De plus, une tendance est observée entre les groupes ayant choisi le robot et la combinaison ($U = 5$; $Z = 1,892$; $p = 0,59$). D'autres expérimentations impliquant un panel plus large pourraient probablement confirmer cette tendance statistique.

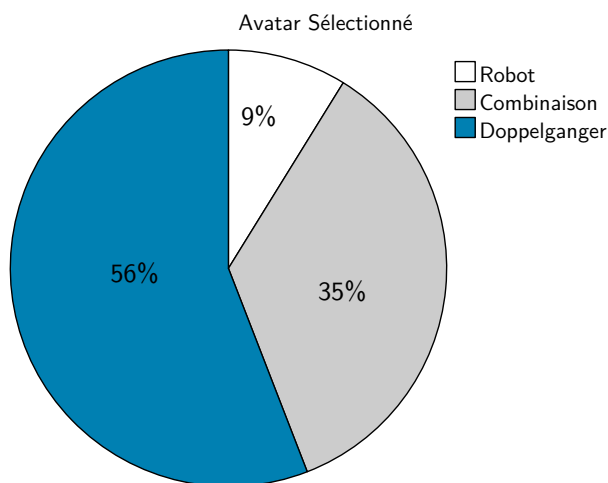


FIGURE 5.6 – Distribution du choix des avatars pour les 34 participants.

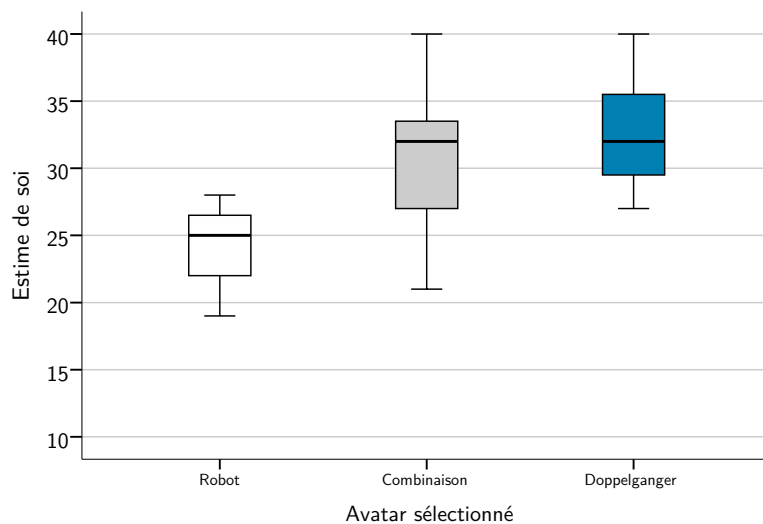


FIGURE 5.7 – Niveau d'estime de soi des participants en fonction de l'avatar sélectionné.

5.5 Discussion

Des travaux antérieurs portant sur la reconstruction 3D démontrent l'impact de la stylisation des avatars sur l'attractivité des modèles [Zell *et al.*, 2015], ou encore mettent en évidence des changements comportementaux induits par la confrontation à un double virtuel [Bailenson et Segovia, 2010]. Dans ce contexte, cette première phase de notre série d'expérimentations contribue à comprendre l'impact de la fidélité visuelle et de l'estime de soi sur l'attractivité perçue des avatars. Il est intéressant de constater que certains participants ont remarqué l'évolution progressive du niveau de véracité des avatars :

J'ai remarqué que les trois personnages devenaient de plus en plus semblables à mon apparence physique. Taille pour le premier, forme pour le second et l'image 3D exacte de ma tête pour le dernier.

Les résultats de notre expérimentation révèlent l'impact positif de la véracité sur l'évaluation de l'attractivité des avatars démontrant ainsi la validité de notre première hypothèse. En effet, l'impact de la fidélité visuelle est significatif lorsqu'il existe un écart de véracité important entre les modèles 3D. Ainsi, les avatars issus de la reconstruction 3D des participants ont enregistré des scores d'attractivité plus élevés par rapport à des représentations plus abstraites, telles que le robot (Figure 5.4). De plus, lors de la phase de sélection de personnages, 56 % des participants déclarent préférer choisir leur double virtuel en vue d'une expérience impliquant le contrôle en temps réel de l'avatar via un système de capture de mouvement :

C'est plaisant d'avoir son propre avatar, de se sentir comme le héros.

J'aurais vraiment l'impression d'être dans le jeu. Habituellement, je prends beaucoup de temps pour construire un personnage qui me ressemble, donc si j'en ai un qui me ressemble exactement, je choisirai celui-ci.

Je choisirais ma propre représentation parce que c'est un avatar unique. Le robot et la combinaison n'ont pas vraiment d'identité, ils sont anonymes, tout le monde peut jouer ces personnages.

Cependant, certains participants ont formulé des remarques intéressantes en faveur des avatars présentant un niveau de véracité moins élevé, soulignant de fait la nécessité de poursuivre les investigations sur l'impact de la représentation de soi en environnement virtuel :

Je joue pour me distraire, pour « me couper du monde », je ne veux pas nécessairement que le personnage me ressemble.

Le personnage robotique me semble intéressant, parce que j'aimerais voir les différentes interactions que l'on peut avoir avec un corps qui n'est pas le nôtre.

Selon l'étude antérieure de Park [2018], l'estime de soi semble pouvoir affecter les réactions des utilisateurs confrontés à leur double virtuel. Notre analyse statistique confirme ces résultats et suggère une relation entre l'avatar sélectionné par les participants et leur niveau respectif d'estime de soi. Les participants ayant une estime de soi plus élevée préfèrent choisir leur propre représentation, tandis que ceux ayant une estime plus faible préfèrent une représentation alternative. Cette tendance semble se vérifier pour les trois avatars, notamment lorsque l'on compare les participants ayant choisi le robot et ceux ayant choisi leur propre représentation (Figure 5.7).

Cependant, alors qu'une majorité des participants mettent l'accent sur la qualité et le réalisme des reconstructions 3D dans les questions ouvertes de notre questionnaire, certains d'entre eux ($N = 6$) semblent être perturbés par la présence de problèmes mineurs dus aux limitations matérielles actuelles. Cet effet secondaire suggère l'apparition du phénomène de la vallée dérangeante (*Uncanny Valley*) [Mori *et al.*, 2012; Seyama et Nagayama, 2007]. En effet, plus le niveau de réalisme des modèles 3D est élevé, moins les participants semblent accepter les défauts observés. Il semble donc nécessaire de tenir compte des limites actuelles des technologies de reconstruction 3D avant d'en envisager l'utilisation pour la production d'applications de réalité virtuelle.

5.5.1 Introduction de la seconde phase expérimentale

Suite aux résultats observés dans cette étude préliminaire, le prochain chapitre présente la seconde phase de notre série d'expérimentations poursuivant l'étude de l'impact de la fidélité des avatars, notamment sur le sentiment d'incarnation et les implications comportementales. Dans cette étude, les utilisateurs contrôleront en temps réel les différents avatars présentés ici via un système de capture de mouvement. Ils seront impliqués dans une série de tâches et de situations pouvant potentiellement affecter l'intégrité de leurs avatars. Il sera alors possible de vérifier l'occurrence de l'effet Proteus induit par l'apparence de la représentation des utilisateurs en environnement virtuel immersif.

Chapitre 6

Expérimentation 2.2 : impact de la fidélité des avatars sur l'incarnation et le comportement

Sommaire

6.1	Résumé	128
6.2	Présentation de l'étude	129
6.3	Matériel et méthodes	131
6.3.1	Application	131
6.3.2	Équipement	133
6.3.3	Participants	133
6.3.4	Procédure	134
6.3.5	Mesures	137
6.3.6	Hypothèses	137
6.4	Résultats	138
6.4.1	Incarnation	138
6.4.2	Implications comportementales	139
6.5	Discussion	142
6.5.1	Impact de la fidélité visuelle sur le sentiment d'incarnation	142
6.5.2	Implications comportementales liées à la fidélité visuelle des avatars	143
6.5.3	Limites de l'étude	145

6.1 Résumé

Ce chapitre restitue la deuxième phase de notre série d'expérimentations portant sur l'impact de la fidélité visuelle des avatars sur le sentiment d'incarnation et le comportement des utilisateurs en environnement virtuel immersif. Cette étude porte notamment sur la notion de véracité, un des trois facteurs de la fidélité visuelle identifié dans notre revue de littérature, correspondant au degré de similarité entre les utilisateurs et leur avatar. Notre expérimentation propose aux participants de contrôler successivement trois avatars via un point de vue à la troisième personne : un robot, une combinaison et leur doppelgänger (représentation de soi virtuelle). Afin d'analyser les réactions et les stratégies des utilisateurs, chaque tâche du scénario de l'application de réalité virtuelle peut potentiellement affecter l'intégrité de leurs personnages. Nos résultats révèlent que le sentiment de possession, l'un des trois facteurs du sentiment d'incarnation, s'avère plus élevé pour les participants contrôlant leur propre représentation plutôt qu'une représentation plus abstraite. De plus, la fidélité visuelle de l'avatar semble affecter l'expérience subjective des utilisateurs, la moitié du panel déclarant avoir eu un comportement différent selon le personnage contrôlé. Les représentations abstraites permettent d'adopter des comportements plus risqués, tandis que les représentations de soi maintiennent une connexion avec le monde réel encourageant les utilisateurs à préserver l'intégrité de leur avatar.



FIGURE 6.1 – Illustration du contenu de l'application de réalité virtuelle utilisée lors de l'expérimentation 2.2 : impact de la fidélité visuelle des avatars sur le sentiment d'incarnation et sur le comportement en environnement virtuel immersif.

6.2 Présentation de l'étude

L'un des défis majeurs concernant les études portant sur la réalité virtuelle consiste à déterminer les facteurs prédominants influençant l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif [Cummings et Bailenson, 2016]. Dans ce contexte, la relation entre les utilisateurs et les avatars a fait l'objet de recherches récentes dans différents champs disciplinaires. Nous avons conçu une série d'expérimentations afin d'étudier l'effet de la fidélité visuelle des avatars sur l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif. Notre objectif est ici d'analyser l'impact du contrôle en temps réel de différents personnages, incluant notre propre représentation modélisée à travers un processus de reconstruction 3D, sur le sentiment d'incarnation [Kiltner *et al.*, 2012] et le comportement.

L'objectif de la phase préalable de notre série d'expérimentations (Chapitre 5, [Gorisse *et al.*, 2018a]) fut d'étudier l'impact de la véracité [Garau, 2003] (Section 2.5.1)) et de l'estime de soi sur l'attractivité perçue, ainsi que sur le processus de sélection de personnages. Les participants ont été confrontés à trois personnages humanoïdes présentant un niveau constant de réalisme (cohérent avec l'environnement virtuel proposé) et trois niveaux de fidélité visuelle : un robot (Figure 6.2a), une combinaison (Figure 6.2b) et leur doppelgänger (version virtuelle de soi [Bailenson et Segovia, 2010]) (Figure 6.2c). En raison des niveaux de réalisme et de véracité induits par la reconstruction des utilisateurs, nous avons également considéré l'occurrence possible du phénomène de la vallée dérangeante [Mori *et al.*, 2012] (Chapitre 2.5.2). En effet, ce phénomène peut potentiellement induire des réactions de répulsion envers les modèles 3D si des incohérences sont observées par les participants sur leur double virtuel [MacDorman *et al.*, 2009; Seyama et Nagayama, 2007]. Nos résultats ont démontré que les évaluations de l'attractivité des avatars sont significativement plus élevées pour les doubles virtuels (intégration directe de la tête des participants grâce aux technologies de reconstruction 3D) et mettent en évidence l'impact de l'estime de soi sur la sélection des personnages, notamment entre les conditions extrêmes (robot *versus* double virtuel). Nos observations démontrent que plus les niveaux d'estime de soi sont élevés, plus les utilisateurs sont enclins à choisir leur propre représentation. Inversement, plus les niveaux d'estime de soi sont faibles, plus les participants favorisent les personnages abstraits. Ces résultats soulignent l'intérêt de proposer des avatars personnalisés, notamment en fonction de l'apparence des utilisateurs. Néanmoins, les entretiens post-passation ont permis le recueil de réflexions intéressantes concernant les représentations abstraites. Certains participants ont notamment souligné que les personnages présentant un niveau de véracité inférieur permettraient de favoriser la « déconnexion » de la réalité.

Sur la base de ces résultats, la deuxième phase de notre expérimentation étudie l'impact de la fidélité visuelle des avatars sur le sentiment d'incarnation et sur le comportement des utilisateurs, un phénomène connu sous le nom d'effet Proteus [Yee et Bailenson, 2007; Yee *et al.*, 2009] (Chapitre 2.5.3). Des travaux antérieurs ont démontré que faire face à un double virtuel en environnement immersif pouvait impacter l'attitude des utilisateurs [Aymerich-Franch *et al.*, 2014; Bailenson et Segovia, 2010; Fox et Bailenson, 2009]. Cependant, peu de recherches ont étudié l'impact du contrôle en temps réel de notre propre représentation via un système de capture de mouvement (synchronisation visuomotrice). Néanmoins, les travaux de Waltemate *et al.* [2018] illustrent l'impact de la personnalisation des avatars sur le sentiment d'incarnation en environnement virtuel en utilisant la métaphore classique du miroir et un point de vue à la première personne. Dans ce contexte, notre étude vise à étendre ces résultats antérieurs à de nouveaux cas d'utilisation potentiels en s'appuyant sur un point de vue à la troisième personne permettant de percevoir l'intégralité du corps de l'avatar contrôlé [Gorisse *et al.*, 2017]. Ainsi, dans cette étude, les participants incarnent trois personnages présentant différents niveaux de véracité (Figure 6.2) et sont impliqués dans une série de tâches et de situations pouvant potentiellement affecter l'intégrité de leur avatar.

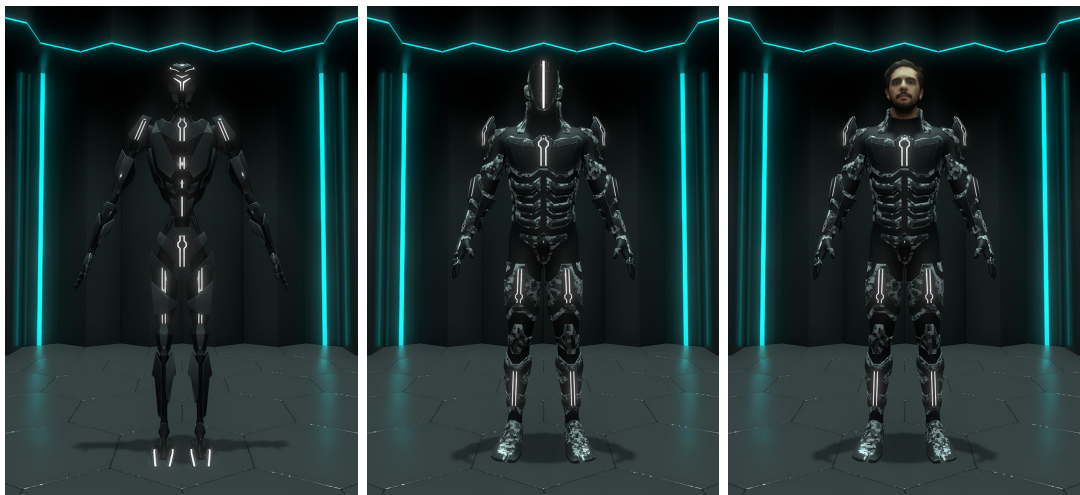
La prochaine partie de ce chapitre présente l'expérimentation et son protocole. La partie 6.4 restitue l'analyse des données collectées. Les résultats de l'expérimentation sont discutés dans la partie 6.5, préalablement à l'évocation des limites de notre étude et aux conclusions de cette dernière phase de notre série d'expérimentations.

6.3 Matériel et méthodes

6.3.1 Application

Le contenu de l'application dédiée à l'expérimentation a été développé à l'aide du moteur de jeu Unity. À l'image de nos expérimentations précédentes, le choix de l'univers graphique et du scénario permet de rendre légitime et plausible la présence des avatars présentant un niveau d'anthropomorphisme constant (schéma corporel humanoïde) et un niveau de réalisme cohérent avec l'environnement virtuel (Annexe C.1). En revanche, conformément aux conditions expérimentales de notre étude préalable, leur niveau de véracité s'avère croissant (Figure 6.2) :

- **Robot** (Figure 6.2a) : le niveau d'anthropomorphisme du robot permet potentiellement aux utilisateurs de projeter leur schéma corporel pour le contrôler. Cependant, sa morphologie ne leur permet pas d'imaginer qu'ils peuvent être physiquement situés « à l'intérieur » du personnage, certaines parties du robot (cou, abdomen, etc.) étant conçues pour ne pas correspondre à une morphologie humaine.
- **Combinaison** (Figure 6.2b) : la combinaison est morphologiquement congruente avec des proportions humaines, permettant potentiellement aux utilisateurs d'imaginer une projection de leur corps à l'intérieur de celle-ci.
- **Doppelgänger** (Figure 6.2c) : le doppelgänger présente également des proportions humaines, mais contrairement à la combinaison, cette représentation intègre la reconstruction 3D de la tête des participants.



(a) Robot

(b) Combinaison

(c) Doppelgänger

FIGURE 6.2 – Illustration des avatars intégrés dans l'application de l'expérimentation 2.2 présentant trois niveaux de véracité.

La direction artistique assure la plausibilité du robot et de la combinaison, ces derniers apparaissent ainsi cohérents dans cet univers de science-fiction, ce qui ne serait pas le cas dans un environnement contemporain. En ce qui concerne les doubles virtuels, nous considérons que la culture populaire actuelle (jeux vidéo, films, romans, etc.) permet aux utilisateurs d'accepter la présence d'avatars humains dans des environnements futuristes. À l'image de notre première expérimentation, l'environnement se compose d'une salle d'entraînement dédiée à la phase d'accommodation et d'une arène principale constituée de plates-formes hexagonales modulaires permettant de configurer dynamiquement l'environnement pour chacune des tâches du scénario. Le système d'éclairage est conçu pour maximiser l'affordance et permet à l'utilisateur de distinguer rapidement les éléments neutres des éléments hostiles.

Par ailleurs, afin de nous prémunir des réactions de répulsion potentielles induites par ce type d'environnement, il a été demandé aux participants d'évaluer leur niveau d'affinité avec la science-fiction grâce à une échelle à cinq points dans le questionnaire pré-expérimentation. Les résultats indiquent la haute affinité du panel avec l'univers proposé ($M = 4,47$; $SD = 0,79$). Si l'on peut présupposer qu'un tel environnement pourrait affecter nos résultats, il a néanmoins été conçu pour maximiser l'implication des participants dans les différentes tâches de notre expérience, ce qui semble nécessaire pour étudier l'expérience utilisateur et le comportement.

Le scénario de l'application développée pour l'expérience se compose d'une phase d'accommodation et de cinq tâches décrites dans les sections suivantes (Figure 6.5). Chaque tâche est conçue pour potentiellement affecter l'intégrité des avatars, permettant ainsi de vérifier l'occurrence de l'effet Proteus à travers l'analyse du comportement et des réactions des participants. Il est à noter que nous avons utilisé un point de vue à la troisième personne dans cette expérience (Figure 6.3b). Bien que de nombreuses études portant sur l'incarnation en environnement virtuel ont recours au point de vue à la première personne (Figure 6.3a) et à des miroirs temps réel, le point de vue à la troisième personne permet de percevoir l'ensemble de l'avatar incarné tout en ouvrant de nouveaux cas d'usage pour la réalité virtuelle. De plus, nos travaux préalables (Chapitre 4) [Gorisse *et al.*, 2017], ainsi que ceux de Debarba *et al.* [2017, 2015], ont démontré qu'il était possible d'induire un sentiment d'incarnation via un point de vue à la troisième personne sous condition de synchronisation visuomotrices.

L'implémentation du point de vue à la troisième personne se base sur nos expérimentations antérieures [Gorisse *et al.*, 2017]. La caméra virtuelle est placée à trois mètres derrière l'avatar (Figure 6.3b). Les éléments intersectant le champ de vision deviennent transparents pour éviter les problèmes d'occultation. La rotation de la caméra est centrée autour du per-

sonnage et proportionnelle à la rotation de la tête des participants. Le système de capture de mouvement permet de naviguer librement et naturellement dans l'environnement virtuel grâce à la synchronisation temps réel de l'ensemble de leurs mouvements corporels. Bien qu'un certain temps d'habituance soit nécessaire pour s'accommoder à cette nouvelle façon de percevoir le corps virtuel contrôlé, chaque participant a maîtrisé ce processus d'interaction en quelques minutes pendant la phase dédiée de l'expérience.

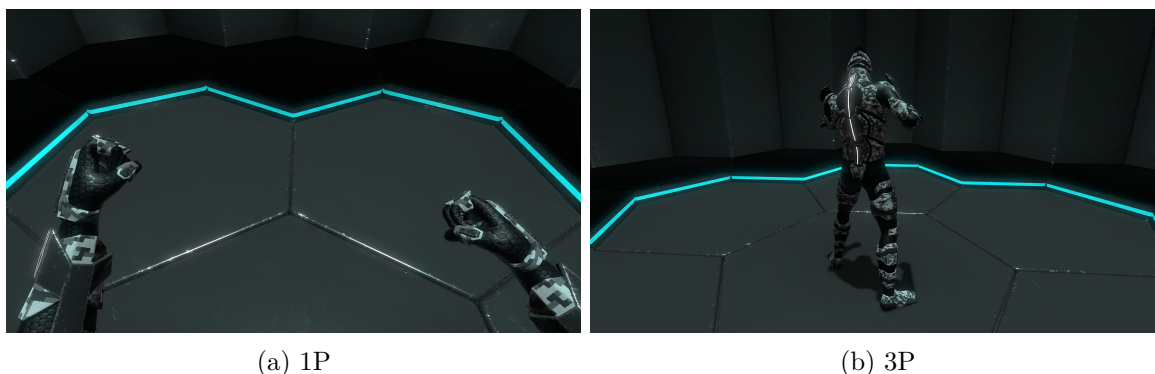


FIGURE 6.3 – Personnage virtuel présentant un niveau de véracité intermédiaire perçu depuis un point de vue à la première (6.3a) et à la troisième personne (6.3b).

6.3.2 Équipement

Le casque de réalité virtuelle HTC Vive et un adaptateur sans fil TP Cast (latence < 2 ms) sont utilisés pour afficher l'environnement virtuel avec une résolution de 2160×1200 pixels (1080×1200 pixels par œil), un champ de vision de 110° et un taux de rafraîchissement de 90 Hz. Nous utilisons également deux contrôleurs Vive et trois Vive Trackers pour restituer les mouvements du corps via des algorithmes de cinématique inverse afin d'animer les avatars en temps réel (Figure 6.4, Annexe C.1 Figures C.5, C.6). Notre système tire parti de ces matériels à faible latence pour délivrer une latence totale inférieure au seuil des 20 ms recommandé pour la réalité virtuelle. L'ordinateur exécutant l'application est composé d'un processeur Intel Xeon E5-1607 @ 3,10 GHz et d'une carte graphique Nvidia GeForce GTX 1080.

6.3.3 Participants

Les 34 participants recrutés pour l'expérimentation préalable (Chapitre 5) ont à nouveau été sollicités. Ces individus masculins, âgés de 21 à 42 ans ($M = 23,79$; $SD = 3,80$), bénéficient d'une vision correcte ou corrigée grâce à des lunettes de vue permettant l'utilisation du casque de réalité virtuelle. Tous les participants ont utilisé au moins une fois un système de réalité virtuelle immersif et ont une expérience du jeu vidéo impliquant le contrôle des avatars (jeux de rôle, jeu de tir à la première et à la troisième personne, plateforme, etc.). Deux raisons



FIGURE 6.4 – Utilisateur équipé avec le matériel requis pour l'expérimentation : casque de réalité virtuelle HTC Vive et adaptateur sans fil TP Cast, Vive Trackers.

ont conduit au recrutement d'un panel expérimenté. Premièrement, cela limite la durée du processus d'accommodation, de cette façon les participants restent concentrés sur le contenu de l'expérience et non sur la nouveauté du dispositif. Deuxièmement, la réalité virtuelle atteignant actuellement le marché de masse, nous supposons que, dans quelques années, la majorité de la population aura accès à ce type de technologie, rendant ainsi nos résultats davantage généralisables.

6.3.4 Procédure

Initialement, les participants ont été conviés à une session de reconstruction 3D, puis chaque modèle a été optimisé pour être intégré dans l'application dédiée à l'expérimentation. Ils ont ensuite été invités à prendre part à l'expérimentation quelques jours plus tard. Après avoir signé un formulaire de consentement, ils ont complété le questionnaire pré-expérimentation permettant recueillir leurs informations démographiques ainsi que leur expérience du jeu vidéo et de la réalité virtuelle. Ils ont ensuite été équipés du matériel requis pour l'expérimentation et ont reçu les instructions nécessaires pour l'expérience. Conformément à notre plan expérimental intra-sujet, les participants répètent le scénario afin de contrôler successivement chacun des trois avatars suivant un ordre de passation contrebalancé. Entre chaque session de l'expérience, les participants remplissent le questionnaire post-passation. Après avoir testé l'ensemble des conditions, ces derniers prennent part à un entretien semi-directif afin de discuter leur ressenti subjectif vis-à-vis de l'expérience.

Description des tâches

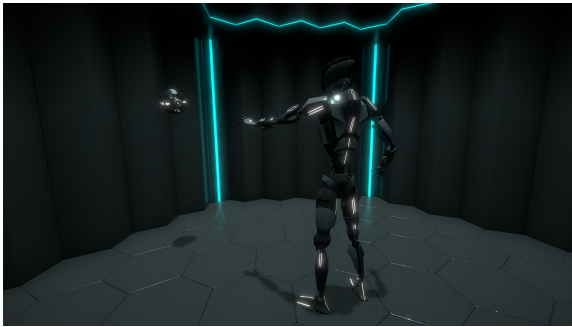
L'objectif des cinq tâches consiste à activer un terminal apparaissant systématiquement du côté opposé de l'arène virtuelle. Une fois déclenchée, l'arène commence son processus de configuration pour adapter dynamiquement l'environnement à la tâche suivante. Chaque tâche est conçue pour potentiellement affecter l'intégrité des avatars. Ce modèle punitif encourage les participants à donner le meilleur d'eux-mêmes, permettant ainsi l'observation de différents comportements et stratégies.

L'expérimentation débute par une phase d'accommodation. Cette étape permet notamment aux participants de se confronter en vis à vis à leur représentation virtuelle avant d'entreprendre le contrôle. À ce stade, ils peuvent observer et tourner librement autour de leur avatar avant d'entrer dans le corps virtuel pour activer le processus de calibration afin de configurer la taille celui-ci et d'activer la capture de mouvement. Une fois calibré, un drone entre dans la pièce et demande à l'utilisateur d'atteindre sa position à cinq reprises. Il est à noter que la plupart des instructions sont expliquées par le drone au sein de l'environnement virtuel afin de fournir des informations similaires à tous les participants. Pendant cette phase d'accommodation, ces derniers sont autorisés à naviguer dans la première salle jusqu'à ce qu'ils se soient habitués au point de vue à la troisième personne et à leur corps virtuel. Ainsi, lorsqu'ils furent interrogés sur les malaises ressentis (cinétose, etc.) lors des entretiens post-passation, les participants ont indiqué avoir été à leur aise grâce à ce processus d'accommodation. Après cette première phase, ils atteignent l'ascenseur central pour pénétrer dans l'arène, afin de réaliser les cinq tâches proposées par le scénario de l'expérimentation (Figure 6.5, Annexe C.1 Figures C.2, C.3, C.4) :

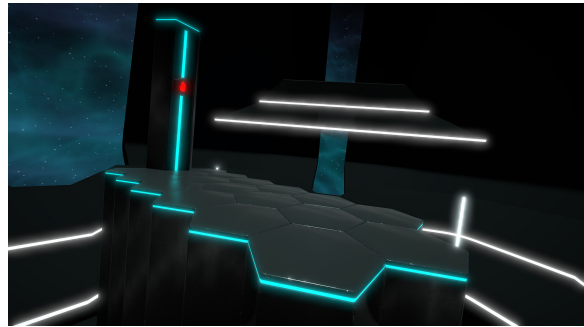
- **Tâche 1 - pont** : la première tâche consiste à traverser un pont afin d'activer un terminal déclenchant la configuration des plates-formes pour la seconde tâche.
- **Tâche 2 - corniches** : la deuxième tâche exige que les utilisateurs marchent le long de corniches situées entre des parois verticales et le vide, tout en évitant de chuter.
- **Tâche 3 - pièges** : la troisième tâche est composée d'un chemin avec des plates-formes piégées. Chaque plate-forme peut activer la section suivante du parcours ou retirer soudainement l'un de ses éléments. Les participants doivent marcher lentement afin d'éviter d'être pris au piège par les plates-formes en mouvement.
- **Tâche 4 - sphères** : la quatrième tâche exige que le participant traverse l'arène tout en esquivant ou en bloquant des sphères tirées par deux tourelles disposées de part et d'autre de l'arène. Les projectiles ne peuvent être bloqués qu'avec les bras des avatars.

Si le l'avatar est heurté par deux sphères, le mode *ragdoll*¹ est activé et ce dernier réapparaît après un fondu au noir sur une plate-forme précédente sécurisée.

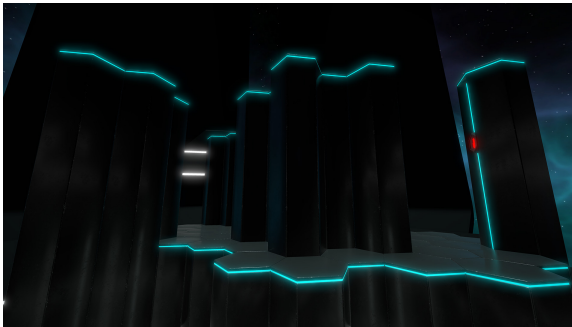
- **Tâche 5 - laser** : lors de la dernière phase, les utilisateurs sont confrontés à un laser rotatif. À l'initialisation de celle-ci, ils sont protégés par un pilier. Ils doivent ensuite se déplacer ou s'accroupir pour éviter le laser afin d'atteindre les piliers suivants et le côté opposé de l'arène. Si le participant est touché par le laser, le mode *ragdoll* de l'avatar est activé et ce dernier débute le processus de réapparition.



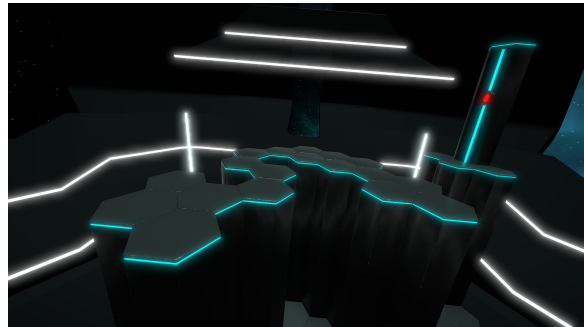
(a) Phase d'accommodation



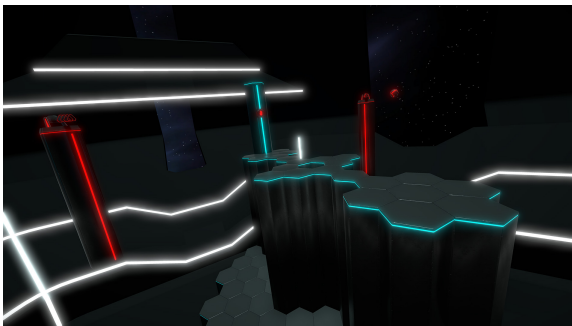
(b) Tâche 1 : pont



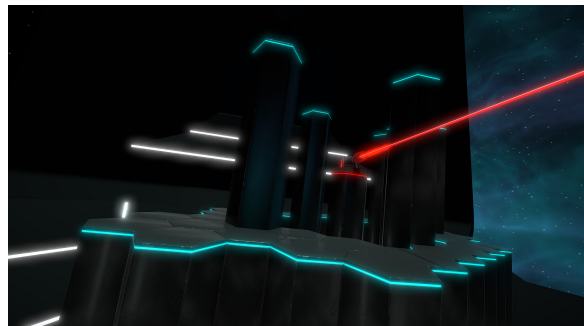
(c) Tâche 2 : corniches



(d) Tâche 3 : pièges



(e) Tâche 4 : sphères



(f) Tâche 5 : laser

FIGURE 6.5 – Configuration de l'arène virtuelle lors des tâches de l'expérimentation 2.2.

1. Utilisé dans les moteurs physiques dédiés à la production de jeu vidéo, le terme de physique *ragdoll* (poupée de chiffon) désigne une technique d'animation procédurale utilisée pour remplacer les traditionnelles animations pré-calculées de mort.

6.3.5 Mesures

Nos mesures se basent sur des données subjectives (qualitatives et quantitatives) et objectives pour collecter et croiser des informations concernant le sentiment d'incarnation et le comportement des utilisateurs. Après chacune des trois sessions de l'expérimentation (une par avatar), les participants complètent la dimension incarnation du questionnaire développé dans le cadre de nos recherches (Chapitre 3) conformément à la procédure présentée dans la partie précédente. Le questionnaire inclut également deux items dédiés à l'effet Proteus évaluant le sentiment de vulnérabilité pendant les différentes tâches de l'expérience (tableau 6.1).

Les données de performance objectives sont collectées via l'application dans un fichier CSV (*Comma-Separated Values*). Ce fichier contient les informations suivantes :

- **Durées de navigation (DN)** : temps de complétion pour chaque tâche du scénario. Cette période correspond à la durée entre l'activation de la section parcourue et l'activation de la section suivante.
- **Chutes (C)** : nombre de chutes pendant la durée de l'expérience.
- **Sphères heurtées (SH)** : nombre de collisions avec les sphères (Figure 6.5e).
- **Sphères déviées (SD)** : nombre de sphères déviées (Figure 6.5e).
- **Lasers touchés (LT)** : nombre de collisions avec le laser (Figure 6.5f).

L'expérimentation se conclut par un entretien semi-directif permettant aux participants de s'exprimer sur leur expérience. Les questions portent sur le sentiment d'incarnation, ainsi que sur les attitudes et les stratégies mises en œuvre face aux situations pouvant menacer leur avatar (guide d'entretien disponible en Annexe C.2). En d'autres termes, ces entretiens aident à évaluer l'occurrence des réactions comportementales induites par l'apparence des avatars. Leurs retranscriptions permettent d'effectuer une analyse sémantique afin d'identifier les propos récurrents et de collecter des remarques pouvant alimenter nos réflexions.

6.3.6 Hypothèses

H1 : Le niveau de véracité de l'avatar influence positivement le sentiment d'incarnation, en particulier le sentiment de possession, en environnement virtuel immersif.

H2 : Le niveau de véracité de l'avatar affecte le comportement et les réactions des utilisateurs face à des situations pouvant potentiellement menacer leur avatar.

6.4 Résultats

Le test Shapiro-Wilk a été utilisé pour vérifier la normalité de la distribution des réponses au questionnaire post-expérimentation. Les variables ne suivant pas une distribution normale ($p < 0,05$ pour toutes les variables testées), nous avons utilisé des tests non paramétriques pour évaluer l'impact de la fidélité visuelle des avatars. Les résultats sont considérés comme significatifs lorsque $p < 0,05$. La correction de Bonferroni est utilisée pour ajuster la valeur alpha lors des comparaisons *post-hoc* par paires.

6.4.1 Incarnation

Les résultats du test de Friedman n'ont pas indiqué de différence significative concernant la localisation de soi et le sentiment d'agentivité entre les trois conditions d'avatar. Néanmoins, les scores moyens d'agentivité sont très élevés (tableau 6.2) pour chacune condition, confirmant que la synchronisation visuomotrice est un facteur critique contribuant au sentiment d'incarnation en environnement virtuel immersif.

Les tests de Friedman ont révélé des différences significatives dans les scores de possession pour les quatre éléments du questionnaire : P-Q1 ($\chi^2 (2, N = 34) = 12,437; p = 0,002$), P-Q2 ($\chi^2 (2, N = 34) = 6,747; p = 0,034$), P-Q3 ($\chi^2 (2, N = 34) = 13,674; p = 0,001$), P-Q4 ($\chi^2 (2, N = 34) = 6,462; p = 0,040$). L'inspection des valeurs médianes a démontré une augmentation du sentiment de possession entre la condition robot et celle de la combinaison, ainsi qu'une augmentation supplémentaire pour celle du doppelgänger pour les quatre items de possession.

Les tests *post-hoc* de Wilcoxon n'ont pas révélé de différences significatives concernant le sentiment de possession entre le robot et la combinaison en raison de la valeur alpha ajustée par la correction de Bonferroni utilisée pour contrôler les erreurs de type 1. Cependant nous avons observé des tendances en faveur de la combinaison pour les items P-Q2 ($Z = 1,988; p = 0,047$) et P-Q3 ($Z = 2,064; p = 0,039$). Ces tests ont également indiqué des différences significatives sur le sentiment de possession entre le robot et le doppelgänger pour les trois premiers items en faveur de la condition doppelgänger : P-Q1 ($Z = 3,180; p = 0,001$), P-Q2 ($Z = 2,764; p = 0,006$), P-Q3 ($Z = 3,353; p = 0,001$). De plus, une tendance a été observée pour le dernier item : P-Q4 ($Z = 19,945; p = 0,052$). Les tests de Wilcoxon ont également révélé une différence significative concernant le sentiment de possession entre la combinaison et le doppelgänger pour le premier item en faveur de la condition doppelgänger : P-Q1 ($Z = 2,557; p = 0,011$) et une tendance pour le deuxième item : P-Q2 ($Z = 1,854; p = 0,064$).

Considérés dans leur ensemble, nos résultats concernant le sentiment d'incarnation en environnement virtuel immersif mettent en évidence l'impact de la fidélité visuelle des avatars, en particulier de la véracité, sur le sentiment de possession (Figure 6.6), fournissant ainsi des preuves de la validité de notre première hypothèse (H1). En effet, nos résultats ont révélé des différences significatives, notamment entre les deux conditions extrêmes (robot *versus* doppelgänger). De plus, les tendances observées entre la combinaison et le robot ainsi qu'entre la combinaison et le doppelgänger pourraient probablement être confirmées par un panel étendu ($N > 34$).

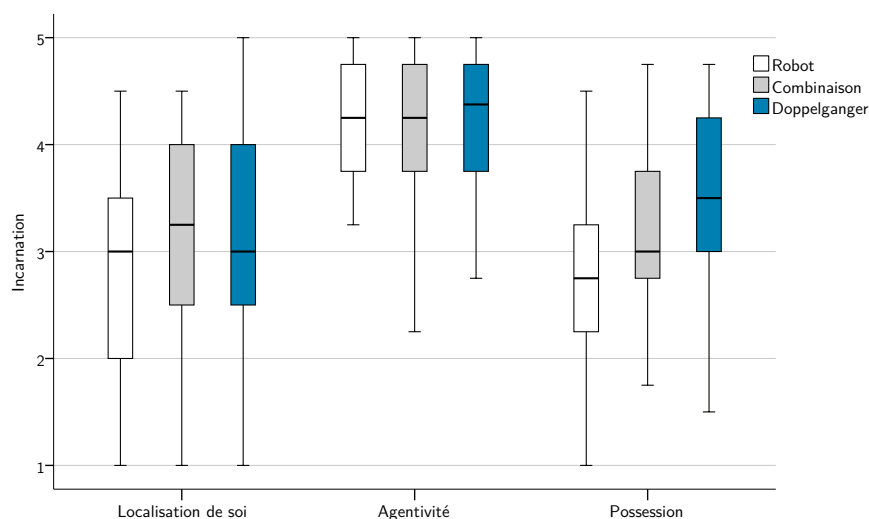


FIGURE 6.6 – Moyennes des facteurs LS, A et P de la dimension incarnation.

6.4.2 Implications comportementales

Les résultats du test de Friedman ont révélé une différence significative pour la première question évaluant l'effet Proteus EP-Q1 ($\chi^2 (2, N = 34) = 7,298$; $p = 0,026$). Toutefois, les tests *post-hoc* avec valeur alpha ajustée n'ont pas révélé de différences significatives dans les comparaisons par paires. Il est à noter que la dispersion des scores concernant l'effet Proteus est très importante. Cela suggère que chaque participant pourrait ressentir différemment les situations pouvant menacer l'intégrité de son avatar.

Concernant les résultats objectifs basés sur les données recueillies par l'application, bien que la plupart des comparaisons des données mesurées n'aient pas révélé de différences significatives, un test de Friedman a néanmoins indiqué une différence significative concernant le nombre de collisions avec les sphères ($\chi^2 (2, N = 34) = 6,024$; $p = 0,049$). Un test de Wilcoxon a révélé une différence significative entre le robot et la combinaison, avec plus de collisions enregistrées pour le robot ($Z = 2,328$; $p = 0,020$).

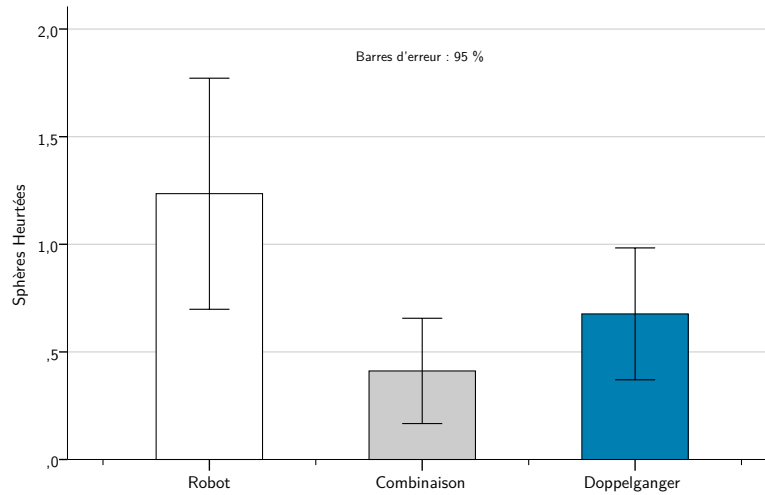


FIGURE 6.7 – Moyennes du nombre de collisions avec les sphères.

Nous avons approfondi ces questions au cours des entretiens post-passation. La moitié du panel ($N = 17$) a déclaré avoir adopté des stratégies différentes selon le personnage contrôlé. Parmi ces participants, 12 se sentaient plus en sécurité lors de l'utilisation du robot en raison de son apparence mécanique augmentant la déconnexion de la réalité. De plus, 12 de ces 17 participants soulignent également le fait que le contrôle de leur double virtuel induit des réactions plus réalistes visant à préserver son intégrité. Ces résultats semblent démontrer que l'expérience subjective vécue par les participants a été affectée par la fidélité visuelle de l'avatar. Cependant, au regard des résultats objectifs, nous ne pouvons pas confirmer qu'elle ait affecté la performance des utilisateurs. Nous examinons et discutons plus en détail dans la partie suivante les informations subjectives rapportées et leurs implications concernant le comportement des participants.

CHAPITRE 6. EXPÉRIMENTATION 2.2 : IMPACT DE LA FIDÉLITÉ DES AVATARS SUR L'INCARNATION ET LE COMPORTEMENT

TABLEAU 6.1 – Questionnaire post-expérimentation composé de deux dimensions : Incarnation (Localisation de Soi - **LS**, Agentivité - **A**, Possession - **P**), Effet Proteus (**EP**). La mention (r) indique les items aux scores inversés.

ID	Questions
LS-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression d'être situé dans le corps virtuel ?
LS-Q2 (r)	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression d'être situé à une certaine distance du corps virtuel, comme si vous regardiez quelqu'un d'autre ?
A-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le corps virtuel bougeait comme vous le vouliez, comme s'il obéissait à votre volonté ?
A-Q2	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le corps virtuel réagissait de la même manière que votre corps ?
A-Q3	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression de pouvoir interagir avec l'environnement de la manière que vous vouliez ?
A-Q4	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression de contrôler le corps virtuel comme s'il s'agissait de votre corps réel ?
P-Q1	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le corps virtuel était votre corps ?
P-Q2 (r)	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que le corps virtuel était quelqu'un d'autre ?
P-Q3	Quand quelque chose affectait le corps virtuel, avez-vous eu l'impression que votre corps réel était également affecté ?
P-Q4	Dans quelle mesure avez-vous oublié votre corps réel au profit du corps virtuel ?
EP-Q1	Dans quelle mesure vous êtes-vous senti vulnérable lors des situations et événements du scénario (altitude, projectiles, laser....) ?
EP-Q2	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression que les situations et événements du scénario (altitude, projectiles, laser...) pouvaient affecter l'intégrité de votre personnage ?

TABLEAU 6.2 – Résumé statistique des réponses au questionnaire post-expérimentation présentant chaque facteur des deux dimensions : Incarnation (Localisation de Soi - **SL**, Agentivité - **A**, Possession - **P**), Effet Proteus (**PE**). Les moyennes et les écarts types sont reportés pour chaque condition (robot, combinaison, doppelgänger). Le seuil de significativité est reporté uniquement quand $p < 0,05$. La mention (r) indique les items aux scores inversés.

ID	Robot		Combinaison		Doppelgänger		p
	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	
LS-Q1	3,26	1,109	3,68	0,976	3,65	1,203	
LS-Q2 (r)	2,74	1,214	2,76	1,232	2,91	1,164	
A-Q1	4,38	0,652	4,41	0,743	4,26	0,828	
A-Q2	4,32	0,684	4,15	0,784	4,26	0,710	
A-Q3	4,15	0,610	4,12	0,808	4,26	0,751	
A-Q4	4,00	0,888	4,00	0,778	4,12	0,669	
P-Q1	2,82	1,141	3,12	0,977	3,59	0,957	0,002
P-Q2 (r)	3,15	1,329	3,56	1,050	3,91	1,138	0,034
P-Q3	2,00	1,181	2,44	1,186	2,76	1,232	< 0,001
P-Q4	3,50	1,187	3,76	1,046	3,82	1,058	0,040
EP-Q1	2,62	1,349	3,12	0,946	2,88	1,149	0,026
EP-Q2	3,35	1,252	3,62	1,155	3,59	1,351	

6.5 Discussion

6.5.1 Impact de la fidélité visuelle sur le sentiment d'incarnation

Des travaux antérieurs ont démontré que l'intégration multisensorielle telle que la synchronisations visuomotrice et visuotactile congruentes sont des facteurs *bottom-up* critiques permettant aux utilisateurs d'incarner différents avatars en environnement virtuel immersif [Kokkinara et Slater, 2014]. Notre étude utilisant un système de capture de mouvement illustre le fait que certains facteurs du sentiment d'incarnation, tels que l'agentivité, sont très élevés dans ces conditions. D'un autre côté, l'investigation principale de notre expérience concerne l'impact du facteur *top-down* qu'est la fidélité visuelle [Garau, 2003]. Nous avons utilisé trois avatars présentant différents niveaux de véracité pour évaluer l'impact de la similarité entre les utilisateurs et les avatars sur le sentiment d'incarnation. Les résultats confirment notre première hypothèse et démontrent que la véracité a un impact positif sur le sentiment d'incarnation en environnement virtuel et notamment sur le facteur de possession. Basée sur des stimuli complexes dans un scénario de jeu immersif, notre étude corrobore, pour un point de vue à la troisième personne, les résultats précédemment observés avec un point de vue à la première personne [Waltemate *et al.*, 2018]. Les participants de l'expérience ont déclaré avoir été plus connectés à leur propre représentation et ont apprécié le fait de contrôler un personnage personnalisé :

Au début, je pensais vraiment que c'était mon corps.

Comme il me représente, je pense que l'immersion est plus forte. Tu as vraiment l'impression de contrôler ton personnage, mais c'est toi.

J'ai préféré l'avatar me représentant avec mon visage, pour la personnalisation. C'est l'expérience personnalisée [...]. J'étais plus dans la peau de mon personnage, l'impact était plus fort.

Cependant, à l'image des observations réalisées dans le cadre de notre étude préalable, certains participants ont noté la présence d'erreurs mineures sur leur modèle 3D dû aux limitations actuelles des technologies de reconstruction 3D. Conformément à la théorie de la vallée dérangement [Mori *et al.*, 2012], ces erreurs peuvent induire des réactions de répulsion envers leur double virtuel. En effet, à cause du haut niveau de réalisme de leur visage virtuel, les participants relèvent aisément la présence d'incohérences par rapport à leur visage réel :

J'avais l'impression que j'étais face à une sorte de copie de moi-même mais qui n'était pas vraiment moi.

Mon double virtuel m'a un peu effrayé, c'était un peu malsain...

Bien que cet effet de bord doive être considéré avant de développer des applications de réalité virtuelle impliquant des avatars basés sur l'apparence des utilisateurs, nos résultats contribuent à étendre les connaissances concernant l'impact de la véracité des avatars. Ils corroborent de plus les résultats antérieurs de Waltemate *et al.* [2018] démontrant que la fidélité visuelle peut améliorer le sentiment d'incarnation en environnement virtuel immersif. Par ailleurs, les travaux de Argelaguet *et al.* [2016] et Latoschik *et al.* [2017] démontrent que les niveaux d'anthropomorphisme et de réalisme d'un personnage virtuel influencent positivement le sentiment de possession. Considérant l'ensemble de ces résultats, il est maintenant possible de confirmer que les trois critères de fidélité visuelle de l'avatar [Garau, 2003] (anthropomorphisme, réalisme et véracité) affectent le sentiment d'incarnation dans les applications de réalité virtuelle à la fois basées sur des points de vue à la première et à la troisième personne.

6.5.2 Implications comportementales liées à la fidélité visuelle des avatars

Selon la théorie de l'effet Proteus [Yee et Bailenson, 2007; Yee *et al.*, 2009], l'apparence des avatars peut affecter le comportement des utilisateurs. Nos résultats corroborent en partie ces constatations. En effet, les données subjectives recueillies par le questionnaire post-expérimentation et les entretiens démontrent que l'expérience de l'utilisateur est affectée par l'apparence des avatars, comme constaté dans de précédentes études [Lucas *et al.*, 2016]. Cependant, peu de données objectives permettent de confirmer que la performance des utilisateurs est significativement affectée par le personnage contrôlé. Néanmoins, la moitié du panel considère que leur avatar a influencé leurs réactions et leur comportement pendant les différentes tâches de l'expérimentation. De nombreux participants ont déclaré se sentir plus en sécurité en utilisant le robot grâce à sa constitution mécanique :

Je me suis senti beaucoup plus puissant avec le robot. J'étais plus confiant. Je suis allé plus vite sur les plate-formes, je suis mort moins de fois. Oui, j'étais plus confiant.

Au début je pensais vraiment que c'était mon corps, [...] au niveau des dangers qu'il y avait dans l'expérience ça m'affectait. J'étais plus dans une situation où il fallait que je joue ma vie qu'avec le robot où j'ai tenté de bloquer le laser,

de repousser les sphères. Je ne l'aurais pas forcément tenté avec mon propre personnage, on dit qu'on a qu'une vie.

Pour moi jouer à un jeu ou vivre une expérience de réalité virtuelle c'est sortir du monde dans lequel on est habituellement. C'est ce que j'aime retrouver quand je fais ce genre d'expérience, et là, c'est comme s'il y avait ingérence du monde physique dans le monde virtuel et du coup ça m'embête un peu qu'il y ait encore des choses comme ça.

À la lumière de ces réflexions, l'utilisation de représentations abstraites peut conduire à augmenter la déconnexion de la réalité et permet aux participants d'agir avec moins de retenue dans le monde virtuel. D'autre part, le doppelgänger semble induire des comportements plus réalistes et une forme d'instinct de préservation. Comme attendu, les participants semblent avoir été moins désindividués, ce qui est un des prérequis pour influencer le comportement des utilisateurs, tel que démontré lors d'expérimentations précédentes portant sur l'effet Proteus [Kiltner *et al.*, 2013; Lugrin *et al.*, 2016]. Les utilisateurs ont ici rapporté avoir été plus prudents afin d'assurer l'intégrité de leur avatar :

Au début ça m'a plus mis dans le personnage de me dire : « OK, il ne faut pas que je tombe parce que c'est moi et ça m'effraye », mais j'étais moins dans le fun. Tu es vraiment plus dans le sérieux, donc il faut que tu fasses attention.

Quand j'incarnais mon propre corps, je n'avais vraiment pas envie de me faire toucher. Alors, qu'avec le robot ça me dérangeait peut-être un peu moins. Il y avait moins cette sensation de vie.

Les propos des participants relatent l'impact de l'apparence des avatars sur leur comportement. Bien que ces restitutions subjectives ne soient que partiellement en adéquation avec nos données objectives, nous avons essayé d'évaluer l'impact de la fidélité visuelle des avatars sur l'expérience utilisateur et non dans un but de performance. C'est pourquoi, dans notre contexte, nous considérons que le ressenti de l'utilisateur prime sur les observations objectives. Ainsi, nos résultats concernant l'impact de la véracité sur le comportement des utilisateurs révèlent que chaque type d'avatar peut être utilisé pour produire des réactions spécifiques et attendues. Les doppelgängers semblent induire des attitudes plus sérieuses et encourager les participants à préserver l'intégrité de leur avatar, la représentation de soi restant un point d'ancrage dans le monde réel. D'autre part, les représentations plus abstraites permettent aux utilisateurs d'être complètement déconnectés de la réalité et de vivre de nouvelles expériences.

6.5.3 Limites de l'étude

L'une des principales limites de notre expérimentation concerne la reconstruction 3D des participants avec des cheveux longs et des mèches relativement fines, limitant dès lors la mixité de notre panel. Il est à noter que de récents travaux ambitionnent de reproduire des cheveux complexes et optimisés pour le rendu 3D temps réel [Hu *et al.*, 2017]. De plus, comme évoqué lors de la restitution de nos expérimentations préalables, nous travaillons actuellement sur des recherches complémentaires portant sur l'impact du genre des utilisateurs et des avatars sur le sentiment d'incarnation en environnement virtuel immersif.

Chapitre 7

Bilan, contributions et perspectives des travaux de recherche

Sommaire

7.1 Réponse à la problématique de recherche	148
7.1.1 Contextualisation des travaux	148
7.1.2 Réponses aux questions de recherche	149
7.2 Synthèse des apports théoriques et expérimentaux	153
7.3 Perspectives et travaux futurs	154

7.1 Réponse à la problématique de recherche

7.1.1 Contextualisation des travaux

Le positionnement de nos recherches s'inscrit dans un contexte où, à l'heure de la démocratisation de la réalité virtuelle, une majorité d'applications repose sur une reconduction de la vision à la première personne induisant un transfert naturel de nos mécanismes perceptifs. Cependant, il est fréquent que ces applications recourent à une représentation partielle, voire omettent l'intégration d'entités visuelles figurant la présence de l'utilisateur et limitant dès lors l'induction d'un sentiment d'incarnation au sein de l'environnement virtuel. Dans ce contexte, l'objectif des travaux entrepris dans le cadre de cette thèse de doctorat, à la frontière des sciences de l'informatique et de la psychologie expérimentale, réside dans l'étude de l'impact de différentes modalités perceptives et graphiques pouvant affecter l'expérience utilisateur. Nos investigations portent notamment sur les sentiments de présence et d'incarnation en environnement virtuel immersif. Ainsi, nos travaux se sont essentiellement scindés en deux axes majeurs :

- Le premier axe de nos recherches porte sur l'étude de l'impact du point de vue sur les sentiments de présence et d'incarnation ainsi que sur les performances des utilisateurs en matière de navigation et d'interaction. Cette première phase de notre projet de recherche a permis de démontrer l'utilisabilité et l'induction potentielle d'un sentiment d'incarnation via le recours à un point de vue à la troisième personne en environnement virtuel immersif (Chapitre 4).
- La seconde phase de nos travaux concerne la notion de fidélité visuelle des avatars. Au travers de deux expérimentations, nos recherches se sont focalisées sur l'impact de la véracité, un des trois critères de la fidélité visuelle correspondant à la similarité entre l'apparence de l'utilisateur et celle de l'avatar. Nous avons notamment investigué l'impact de cette modalité sur le processus de sélection de personnage (Chapitre 5), ainsi que sur le sentiment d'incarnation et le comportement d'utilisateurs immergés dans une application de réalité virtuelle (Chapitre 6).

Nous avons ainsi eu l'occasion de mener trois expérimentations ambitionnant de répondre à la problématique identifiée aux prémices de nos trois années d'étude. Pour apporter une conclusion à l'ensemble des travaux entrepris, nous allons à présent restituer les éléments de réponse aux questions de recherche initialement formulées et dresser le bilan des contributions méthodologiques et expérimentales de nos investigations.

7.1.2 Réponses aux questions de recherche

Point de vue en environnement virtuel immersif

Le premier aspect de notre problématique concerne l'analyse des potentialités offertes par le recours à différentes modalités de point de vue en environnement immersif. Ainsi notre première question de recherche porte sur l'impact des points de vue à la première et à la troisième personne sur l'expérience utilisateur et les performances :

Q1 : Quel est l'impact du point de vue sur les sentiments de présence et d'incarnation, ainsi que sur les performances des utilisateurs en matière de navigation et d'interactions en environnement virtuel immersif ?

Pour apporter des éléments de réponse à cette question de recherche, nous avons développé une expérimentation permettant de comparer l'impact des points de vue à la première et à la troisième personne sur les notions de présence physique et d'incarnation. La conception de cette expérience permet également l'évaluation de la capacité de perception ainsi que des performances des utilisateurs lors des phases de navigation et d'interaction (Chapitre 4). Nos résultats démontrent que si la présence physique ne semble pas être affectée par les modalités de point de vue, deux des trois dimensions constituant le sentiment d'incarnation sont elles impactées. En effet, le point de vue à la première personne favorise la sensation d'être localisé dans le corps virtuel ainsi que le sentiment de possession de ce dernier. Cependant, bien qu'inférieur d'après nos données, ce sentiment de possession demeure relativement élevé en troisième personne. Ce constat peut potentiellement s'expliquer par la synchronisation visuomotrice, identifiée par la littérature comme étant un facteur prépondérant du sentiment d'incarnation. De plus, nous n'avons pas observé de différences significatives concernant le sentiment d'agentivité, ce dernier s'avérant très élevé indépendamment de la modalité de point de vue utilisé.

Au-delà des notions de présence et d'incarnation, nous avons pu identifier différentes situations propices à l'utilisation de chaque point de vue. Concernant la conscience de l'espace et la capacité de perception de l'environnement, les résultats penchent significativement en faveur du point de vue à la troisième personne. Cependant, plus les interactions proposées requièrent une précision importante, plus le point de vue à la première personne est plébiscité par les participants. En effet, si les données objectives ne permettent pas d'identifier une modalité plus favorable concernant les interactions avec des éléments mobiles, les interactions de précision se sont avérées plus efficaces en première personne. Enfin, l'évaluation des temps

de navigation donne également un avantage au point de vue à la première personne. Pour autant, l'appropriation du point de vue à la troisième personne nous a permis d'observer la mise en place de nouvelles stratégies de déplacement. Il serait intéressant de mener une étude plus approfondie sur cet aspect auprès d'un panel d'utilisateurs confirmés.

En conclusion, la confrontation des résultats en matière de présence, d'incarnation et de performance démontre la possibilité de recourir à l'usage des points de vue à la première et à la troisième personne pour induire un sentiment de présence physique. Cependant, le point de vue à la première personne demeure un vecteur d'incarnation plus efficace. Ce point de vue induit une inclusion maximale de l'utilisateur au sein de l'environnement virtuel, notamment grâce à la transposition naturelle de nos mécanismes perceptifs et présente les conditions les plus appropriées pour les interactions de précision. Cependant, les niveaux d'agentivité et de possession observés en troisième personne démontrent que l'induction d'un sentiment d'incarnation est également possible sous condition de synchronisation visuomotrice. De plus, ce point de vue octroie une meilleure perception de l'environnement pouvant permettre le développement de nouveaux cas d'usage pour la production d'applications de réalité virtuelle.

Fidélité visuelle des avatars

Dans un second temps, nous avons souhaité étudier l'impact de la fidélité visuelle des avatars grâce, notamment, à la mise en œuvre de procédés de reconstruction permettant la création et l'intégration de personnages à l'image des utilisateurs. L'ambition affichée de notre deuxième phase de recherche fut alors de définir l'impact de la similarité entre l'utilisateur et son avatar sur le processus de sélection de personnages, ainsi que sur le sentiment d'incarnation et les implications comportementales associées. Les travaux entrepris dans le cadre de la seconde partie de ce projet doctoral se sont donc articulés autour de la question de recherche suivante :

***Q2 :** Quel est l'impact de la fidélité visuelle des avatars, notamment de la similarité entre l'utilisateur et l'avatar, sur le sentiment d'incarnation et sur le comportement des utilisateurs en environnement virtuel immersif ?*

Pour répondre à cette question de recherche, nous avons développé deux expérimentations afin de déterminer l'impact de la véracité sur les différentes dimensions du sentiment d'incarnation et d'identifier les implications comportementales liées à la similitude entre l'apparence du modèle d'un avatar et celle de l'utilisateur.

La première expérimentation de cette série d'études porte sur l'impact de la véracité des avatars et de l'estime de soi sur l'attractivité perçue et le processus de sélection de personnages. Suite à la reconstruction 3D des bustes de l'ensemble des participants, ces derniers ont été immergés dans un environnement virtuel devant trois personnages présentant plusieurs niveaux de fidélité visuelle : un robot, une combinaison et un double virtuel (Chapitre 5). Nos résultats démontrent que les évaluations de l'attractivité des avatars sont significativement plus élevées pour les doubles virtuels (intégration directe de la tête des participants) et mettent en évidence l'impact de l'estime de soi sur la sélection de personnages, en particulier entre les conditions extrêmes (robot *versus* double virtuel). Les participants dont l'estime de soi est plus faible sont plus enclins à choisir des représentations abstraites, tandis que ceux dont le niveau d'estime est plus élevé préfèrent choisir leur propre représentation pour entrer dans le monde virtuel. Ces résultats démontrent l'intérêt de proposer des avatars personnalisés, notamment basés sur l'apparence des utilisateurs. Cependant, selon le cas d'usage de chaque expérience de réalité virtuelle, et conformément aux préférences de certains de nos participants, proposer des personnages plus abstraits permettrait de favoriser la déconnexion des utilisateurs avec la réalité.

Sur la base des observations réalisées lors de cette première phase, la deuxième étude de notre série d'expérimentations a permis l'investigation de l'impact de la fidélité visuelle des avatars sur le sentiment d'incarnation et le comportement des utilisateurs pour des applications de réalité virtuelle utilisant un point de vue à la troisième personne. Dans la continuité des travaux entrepris, cette seconde phase s'est avérée essentiellement focalisée sur l'impact de la véracité, c'est-à-dire de la similitude entre les utilisateurs et leur avatar. Nos résultats ont démontré que le sentiment d'incarnation s'avère plus élevé pour les participants contrôlant leur propre représentation plutôt que des représentations plus abstraites telles que le robot ou la combinaison. Si la fidélité visuelle ne semble pas avoir d'impact sur la localisation de soi et le sentiment d'agentivité, notre analyse statistique a cependant révélé des différences significatives concernant le sentiment de possession entre le robot et le doppelgänger en faveur de ce dernier. Les résultats des tests statistiques entre la combinaison et les autres conditions permettent également d'observer la tendance du sentiment de possession à croître en fonction du niveau de véracité. Il est à noter que si le doppelgänger peut être utilisé comme vecteur d'incarnation, certains participants ont néanmoins remarqué des défauts de reconstruction sur leur représentation, réduisant leur affinité envers leur avatar. Bien qu'il s'agisse d'une minorité de participants, il s'avère nécessaire de tenir compte des limitations matérielles actuelles avant d'entreprendre le développement d'applications reposant sur des technologies de reconstruction 3D.

Concernant l'impact de l'apparence des avatars sur le comportement des utilisateurs, nous pouvons distinguer les résultats subjectifs basés sur notre questionnaire, les entretiens post-passation et les données objectives collectées par notre application. En effet, les données mesurées n'ont révélé que peu de différences significatives concernant le comportement des utilisateurs entre les trois conditions de véracité des avatars. Cependant, lors des entretiens avec les participants, la moitié du panel a déclaré avoir des réactions et des stratégies différentes selon le personnage contrôlé. Les représentations abstraites, en particulier le robot, permettent aux utilisateurs de se déconnecter complètement de la réalité et induisent l'adoption de comportements plus « risqués ». À l'inverse, il apparaît que le doppelgänger maintient une connexion avec le monde physique et encourage les utilisateurs à assurer l'intégrité de leur avatar.

En conclusion, la fidélité visuelle des avatars, notamment le facteur de véracité, peut être un levier permettant d'accroître le sentiment d'incarnation en environnement virtuel immersif. Cependant, ce critère affectant l'expérience subjective des utilisateurs, il se doit d'être exploité judicieusement pour concevoir des applications de réalité virtuelle permettant d'induire des comportements spécifiques.

7.2 Synthèse des apports théoriques et expérimentaux

Les travaux de recherche entrepris dans le cadre de cette thèse de doctorat contribuent à la fois sur un plan théorique et expérimental à étendre les connaissances sur la notion d’avatar et son impact sur l’expérience procurée aux utilisateurs d’environnements virtuels immersifs.

Sur un plan théorique, nos travaux proposent une articulation des notions de présence et d’incarnation au travers d’un méta-modèle reposant sur des intrications identifiées entre ces concepts lors de notre revue de littérature [Gorisse *et al.*, 2018b]. La proposition de ce méta-modèle *Présence - Incarnation* aboutit au développement d’un questionnaire psychométrique utilisé lors de nos expérimentations dont les résultats d’évaluation de la fiabilité permettent une assise suffisante pour poursuivre sa mise à l’épreuve et achever sa construction.

Sur un plan expérimental, les trois études menées dans le cadre de nos recherches permettent d’identifier plusieurs paramètres perceptifs et graphiques impactant les sentiments de présence et d’incarnation, le comportement des utilisateurs ainsi que les performances en matière de navigation et d’interactions en environnement virtuel immersif :

1. Notre première étude démontre la possibilité d’avoir recours au point de vue à la troisième personne en réalité virtuelle, tout en conservant un sentiment d’incarnation élevé. Nos résultats permettent également d’identifier les potentialités octroyées par les points de vue à la première et à la troisième personne concernant la capacité de perception et les performances des utilisateurs en matière de navigation et d’interaction (Chapitre 4) [Gorisse *et al.*, 2017].
2. La première phase de notre série d’expérimentations portant sur l’impact de la fidélité visuelle des avatars démontre l’impact positif de la similarité entre l’apparence de l’utilisateur et celle de l’avatar sur l’évaluation de l’attractivité des modèles. Nos résultats illustrent également l’influence de l’estime de soi et de la véracité des modèles 3D sur le processus de sélection de personnages (Chapitre 5) [Gorisse *et al.*, 2018a].
3. La deuxième phase de cette série d’expérimentation démontre l’impact positif de la véracité des avatars sur le sentiment d’incarnation, ainsi que son effet sur l’expérience subjective et le comportement des utilisateurs. Ainsi, les représentations abstraites induisent une déconnexion accrue de la réalité, tandis que l’incarnation d’un double virtuel incite l’utilisateur à préserver l’intégrité de son avatar (Chapitre 6) [Gorisse *et al.*, in press].

7.3 Perspectives et travaux futurs

À la lumière des travaux entrepris dans le cadre de cette thèse de doctorat, nous envisageons de poursuivre les investigations concernant le sentiment d’incarnation et les implications comportementales induites par l’apparence des avatars en environnement virtuel immersif.

Un des premiers axes potentiels pour la poursuite de ces travaux concerne la notion de point de vue. Nous avons pu identifier lors de notre première étude les potentialités offertes par le recours aux points de vue à la première et à la troisième personne. Dans le cadre de cette étude, le paramétrage du point de vue à la troisième personne repose sur des tests empiriques préalables ayant permis de définir la position optimale de la caméra. Celle-ci permet notamment une visualisation intégrale du corps de l’avatar contrôlé. Néanmoins, des questionnements demeurent sur l’impact des déclinaisons potentielles de ce type de point de vue. Ainsi, la variation de la distance entre la caméra et l’avatar pourrait faire l’objet d’études dédiées afin d’investiguer les implications des rapports proxémiques entre l’utilisateur et son avatar sur le sentiment d’incarnation en environnement virtuel immersif. De plus, à l’occasion de notre première étude, nous avons pu observer la faculté d’adaptation de certains participants aux différentes modalités de point de vue. La réalisation de tests utilisateurs ultérieurs, sur des individus extérieurs aux panels de nos expérimentations, nous a permis de constater qu’autoriser la modification du point de vue en temps réel permettrait potentiellement de tirer parti des avantages octroyés par chacune des conditions. Ainsi, il serait intéressant d’étudier la capacité des utilisateurs à contrôler le point de vue afin d’en évaluer l’impact sur l’expérience procurée en environnement virtuel immersif. L’objectif serait ici d’analyser si le contrôle volontaire de ces conditions permet aux utilisateurs de bénéficier des potentialités de chacune des modalités, tant en termes d’expérience que de performance.

Concernant les recherches portant sur la fidélité visuelle des avatars, les résultats observés dans le cadre de nos travaux reposent sur l’utilisation de systèmes de capture de mouvement permettant une restitution naturelle des déplacements et une synchronisation visuomotrice entre l’utilisateur et son avatar. Ce couplage entre le corps et l’image est connu pour favoriser le sentiment d’incarnation en environnement virtuel, notamment par l’induction d’un haut niveau d’agentivité. Bien qu’en dehors du périmètre de nos travaux actuels, il serait néanmoins intéressant d’entreprendre des études comparatives proposant des conditions de fidélité comportementale inférieures via des périphériques de contrôle plus communs (e.g. manette ou clavier). De telles études permettraient de mettre en évidence l’impact de l’interface sur le sentiment de possession et ainsi d’observer si le contrôle d’un double virtuel

favorise également le sentiment d’incarnation pour des applications 3D temps réel classiques. D’un point de vue comportemental, notre dernière expérimentation a révélé des attitudes spécifiques entre les conditions extrêmes représentées par le robot et le doppelgänger. Si l’incarnation d’un avatar abstrait semble accroître la déconnexion des utilisateurs avec la réalité, le contrôle d’un double virtuel induit, quant à lui, une attitude visant à préserver l’intégrité de l’avatar. Il serait alors intéressant de prolonger ces investigations en croisant ces conditions pour analyser les réactions des utilisateurs lors du contrôle d’un personnage hybride présentant un corps mécanique, à l’image de notre robot, mais intégrant la modélisation de la tête des participants. Nous serions ainsi en mesure d’observer si le comportement des utilisateurs s’avère majoritairement affecté par le corps mécanique ou si ces derniers se focalisent sur la préservation de leur propre représentation.

Par ailleurs, nous avons l’ambition d’étendre la portée des travaux entrepris dans le cadre de ces recherches aux notions liées à l’expérience utilisateur à la marge du périmètre de cette thèse. Ainsi, si nos travaux de doctorat se sont avérés focalisés sur la relation entre l’utilisateur et son avatar, nous envisageons à présent d’étudier l’impact de l’apparence des avatars sur le sentiment de présence sociale et sur les implications comportementales en environnement immersif multi-utilisateur.

Bibliographie

- AMATO, É. et PERÉNY, E. (2013). *Les avatars jouables des mondes numériques. Théories, terrains et témoignages de pratiques interactives*. Hermès-Lavoisier. 4
- AMATO, E. A. (2008). *Le jeu vidéo comme dispositif d’instanciation : du phénomène ludique aux avatars en réseau*. Thèse de doctorat, Paris 8. 4
- AMATO, É. A. (2014). Pour une théorie unificatrice du jeu vidéo : le modèle analytique de la co-instanciation. *psychologie clinique*, 37(1):52–66. 38
- 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 (VR)*, pages 3–10, Greenville, SC. 42, 58, 84, 143
- AYMERICH-FRANCH, L. (2015). Exploring Avatar Personality Preferences in Virtual Worlds. *TIKM Journal of Film*, 1(1):20–24. 17
- AYMERICH-FRANCH, L. et BAIENSON, J. (2014). The use of doppelgangers in virtual reality to treat public speaking anxiety : a gender comparison. *In Proceedings of the International Society for Presence Research Annual Conference*, pages 173–186. CiteSeer. 59
- AYMERICH-FRANCH, L., KIZILCEC, R. F. et BAIENSON, J. N. (2014). The relationship between virtual self similarity and social anxiety. *Frontiers in human neuroscience*, 8:944. 130
- BAIENSON, J., BEALL, A., BLASCOVICH, J., RAIMUNDO, M. et WEISBUCH, M. (2001). Intelligent Agents Who Wear Your Face : Users’ Reactions to the Virtual Self. *In International Workshop on Intelligent Virtual Agents*, volume 2190, pages 86–99. Springer Berlin Heidelberg. 59, 89
- BAIENSON, J. N., BEALL, A. C., BLASCOVICH, J. et REX, C. (2004). Examining virtual busts : Are photogrammetrically generated head models effective for person identification ? *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 13(4):416–427. 59

- BAILENSON, J. N., BLASCOVICH, J. et GUADAGNO, R. E. (2008). Self-Representations in Immersive Virtual Environments. *Journal of Applied Social Psychology*, 38(11):2673–2690. 59
- BAILENSON, J. N. et SEGOVIA, K. Y. (2010). Virtual doppelgangers : Psychological effects of avatars who ignore their owners. In BAINBRIDGE, W. S., éditeur : *Online Worlds : Convergence of the Real and the Virtual*, pages 175–186. Springer London, London. 59, 117, 124, 129, 130
- BANAKOU, D., GROTEN, R. et SLATER, M. (2013). Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(31):12846–12851. 41, 65
- 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. 66
- BAUDOUIN, C. (1963). *L'œuvre de Jung*. Paris, Payot Poche. 18
- BEM, D. J. (1972). Self-perception theory1. In *Advances in experimental social psychology*, volume 6, pages 1–62. Elsevier. 64
- BENFORD, S., BOWERS, J., FAHLÉN, L. E., GREENHALGH, C. et SNOWDON, D. (1995). User embodiment in collaborative virtual environments. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '95, pages 242–249, New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 59
- BENFORD, S., BOWERS, J., FAHLÉN, L. E., GREENHALGH, C. et SNOWDON, D. (1997). Embodiments, avatars, clones and agents for multi-user, multi-sensory virtual worlds. *Multimedia Systems*, 5(2):93–104. 59
- BERTHOZ, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob. 88
- BERTHOZ, A. (2009). *Simpléxité (La)*. Odile Jacob. 88
- BERTHOZ, A. et JORLAND, G. (2004). *Empathie (L')*. Odile Jacob. 88
- BERTHOZ, A. et PETIT, J.-L. (2006). *Phénoménologie et physiologie de l'action*. Odile Jacob. 88
- BIOCCA, F. (1997). The Cyborg's Dilemma : Progressive Embodiment in Virtual Environments [1]. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2):0–0. xxvii, 30, 31, 32, 36, 38, 56, 75

- BIOCCA, F. et HARMS, C. (2002). Defining and measuring social presence : Contribution to the networked minds theory and measure. *Proceedings of PRESENCE*, 2002:7–36. 35, 36, 81
- BLANKE, O., LANDIS, T., SPINELLI, L. et SEECK, M. (2004). Out-of-body experience and autoscoping of neurological origin. *Brain*, 127(243-258). 39
- BLANKE, O. et METZINGER, T. (2009). Full-body illusions and minimal phenomenal selfhood. *Trends in cognitive sciences*, 13(1):7–13. 39, 40, 51
- BLANKE, O. et MOHR, C. (2005). Out-of-body experience, heautoscopy, and autoscopic hallucination of neurological origin : Implications for neurocognitive mechanisms of corporeal awareness and self-consciousness. *Brain Research Reviews*, 50(1):184–199. xxi, 39
- BOBERG, M., PIIPPO, P. et OLLILA, E. (2008). Designing Avatars. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Digital Interactive Media in Entertainment and Arts*, DIMEA '08, pages 232–239, New York, NY, USA. ACM. 15
- BOTVINICK, M. et COHEN, J. (1998). Rubber hands' feel'touch that eyes see. *Nature*, 391(6669):756. 37, 41, 68
- BOULIC, R., MAUPU, D. et THALMANN, D. (2009). On scaling strategies for the full-body postural control of virtual mannequins. *Interacting with Computers*, 21(1-2):11–25. 49
- BOVET, S., DEBARBA, H. G., HERBELIN, B., MOLLA, E. et BOULIC, R. (2018). The critical role of self-contact for embodiment in virtual reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(4):1428–1436. 41
- BULL, R. et RUMSEY, N. (1988). Springer series in social psychology. the social psychology of facial appearance. new york, ny, us. 59
- BYSTROM, K.-E., BARFIELD, W. et HENDRIX, C. (1999). A conceptual model of the sense of presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2):241–244. xxi, 27, 28
- CACIOPPO, S. (2016). What Happens in Your Brain During Mental Dissociation ? A Quest Towards Neural Markers of a Unified Sense of Self. *Current Behavioral Neuroscience Reports*, 3(1):1–9. 39
- CASPAR, E. A., CLEEREMANS, A. et HAGGARD, P. (2015). The relationship between human agency and embodiment. *Consciousness and cognition*, 33:226–236. 40

- CHAGUÉ, S. et CHARBONNIER, C. (2015). Digital cloning for an increased feeling of presence in collaborative virtual reality environments. *In International Conference on 3D Body Scanning Technologies*. 117
- CHENG, L.-K., CHIENG, M.-H. et CHIENG, W.-H. (2014). Measuring virtual experience in a three-dimensional virtual reality interactive simulator environment : a structural equation modeling approach. *Virtual Reality*, 18(3):173–188. 23, 24
- CHRISTY, K. R. et FOX, J. (2016). Transportability and Presence as Predictors of Avatar Identification Within Narrative Video Games. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 19(4):283–287. 37
- COVACI, A., OLIVIER, A.-H. et MULTON, F. (2014). Third Person View and Guidance for More Natural Motor Behaviour in Immersive Basketball Playing. *In Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 55–64, New York, NY, USA. ACM. 49, 93
- CREEM-REGEHR, S. H., STEFANUCCI, J. K., THOMPSON, W. B., NASH, N. et MCCARDELL, M. (2015). Egocentric distance perception in the oculus rift (dk2). *In Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception, SAP '15*, pages 47–50, New York, NY, USA. ACM. 48
- CRUZ-NEIRA, C., SANDIN, D. J. et DEFANTI, T. A. (1993). Surround-screen projection-based virtual reality : The design and implementation of the cave. *In Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '93*, pages 135–142, New York, NY, USA. ACM. 18
- CUMMINGS, J. J. et BAIENSON, J. N. (2016). How immersive is enough ? A meta-analysis of the effect of immersive technology on user presence. *Media Psychology*, 19(2):272–309. 26, 28, 42, 55, 93, 129
- CUMMINGS, J. J., BAIENSON, J. N. et FIDLER, M. J. (2012). How Immersive is Enough ? : A Foundation for a Meta-analysis of the Effect of Immersive Technology on Measured Presence. *In Proceedings of the International Society for Presence Research Annual Conference*. 28
- de VIGNEMONT, F. (2011). Embodiment, ownership and disownership. *Consciousness and cognition*, 20(1):82–93. 38
- DEBARBA, H. G., BOVET, S., SALOMON, R., BLANKE, O., HERBELIN, B. et BOULIC, R.

- (2017). Characterizing first and third person viewpoints and their alternation for embodied interaction in virtual reality. *PloS one*, 12(12):e0190109. 39, 51, 52, 132
- 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 (3DUI)*, pages 67–72, Arles. 39, 40, 49, 50, 51, 52, 55, 84, 89, 93, 109, 110, 132
- DENISOVA, A. et CAIRNS, P. (2015). First person vs. third person perspective in digital games : Do player preferences affect immersion ? *In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, pages 145–148, New York, NY, USA. ACM. 46, 48
- DRAPER, S. W. et NORMAN, D. (1986). User centered system design. *New Perspectives on Hu.* 21
- DURLACH, N. et SLATER, M. (2000). Presence in shared virtual environments and virtual togetherness. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 9(2):214–217. 35
- EHRSSON, H. H. (2007). The experimental induction of out-of-body experiences. *Science*, 317(5841):1048–1048. 37, 51
- EHRSSON, H. H. (2012). The Concept of Body Ownership and Its Relation to Multisensory Integration. *In The New Handbook of Multisensory Processes*, volume 317, chapitre 43, pages 775–792. Cambridge, MA : MIT Press, b. e. stei édition. 39
- EYNARD, R. (2016). *Investigation de l'impact de l'interaction sociale vocale sur l'expérience utilisateur dans les environnements 3D temps-réel immersif*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Arts et Métiers. 35
- FLEMING, R., MOHLER, B. J., ROMERO, J., BLACK, M. J. et BREIDT, M. (2017). Appealing avatars from 3d body scans : Perceptual effects of stylization. *In BRAZ, J., MAGNENAT-THALMANN, N., RICHARD, P., LINSEN, L., TELEA, A., BATTIATO, S. et IMAI, F., éditeurs : Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, pages 175–196, Cham. Springer International Publishing. 57, 58, 117
- FOX, J., AHN, S. J., JANSSEN, J. H., YEYKELIS, L., SEGOVIA, K. Y. et BAIENSON, J. N. (2014). Avatars Versus Agents : A Meta-Analysis Quantifying the Effect of Agency on Social Influence. *Human-Computer Interaction*, 30(5):401–432. 16

- FOX, J. et BAIENSON, J. (2009). Virtual Self-Modeling : The Effects of Vicarious Reinforcement and Identification on Exercise Behaviors. *Media Psychology*, 12(1):1–25. 59, 130
- FUCHS, P., MOREAU, G. et BURKHARDT, J.-M. (2006). Le traité de la réalité virtuelle volume 2-l’interfaçage : l’immersion et l’interaction en environnement virtuel. 48
- GARAU, M. (2003). *The Impact of Avatar Fidelity on Social Interaction in Virtual Environments*. Thèse de doctorat, University College London. 19, 54, 55, 59, 70, 117, 129, 142, 143
- GOFFMAN, E. (1963). Comment se conduire dans les lieux publics. *Notes sur l’organisation sociale des rassemblements*. 35
- GONZALEZ-FRANCO, M., BELLIDO, A. I., BLOM, K. J., SLATER, M. et RODRIGUEZ-FORNELLS, A. (2016). The neurological traces of look-alike avatars. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10:392. 59
- GONZALEZ-FRANCO, M. et PECK, T. C. (2018). Avatar embodiment. towards a standardized questionnaire. *Frontiers in Robotics and AI*, 5:74. 84
- GORISSE, G. (2015). *Rapport d’étape du projet « Devenez Avatar »*. 4, 87, 88
- 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. 76, 130, 132, 153
- GORISSE, G., CHRISTMANN, O., AMATO, E. A. et RICHIR, S. (in press). From Robot to Virtual Doppelganger : Impact of Visual Fidelity of Avatars Controlled in Third-Person Perspective on Embodiment and Behavior in Immersive Virtual Environments. *Frontiers in Robotics and AI*. 153
- GORISSE, G., CHRISTMANN, O., HOUZANGBE, S. et RICHIR, S. (2018a). 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*, pages 48 :1–48 :5, New York, NY, USA. ACM. 129, 153
- GORISSE, G., CHRISTMANN, O. et RICHIR, S. (2018b). 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. xxii, 74, 75, 153

- GREEN, R. D., MACDORMAN, K. F., HO, C.-C. et VASUDEVAN, S. (2008). Sensitivity to the proportions of faces that vary in human likeness. *Computers in Human Behavior*, 24(5):2456–2474. 62
- HASSENZAHN, M., PLATZ, A., BURMESTER, M. et LEHNER, K. (2000). Hedonic and ergonomic quality aspects determine a software’s appeal. *In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’00, pages 201–208, New York, NY, USA. ACM. 20
- HEETER, C. (1992). Being There : The Subjective Experience of Presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1(2):262–271. xxvii, 25, 30, 31, 32, 34
- HOYET, L., ARGELAGUET, F., NICOLE, C. et LÉCUYER, A. (2016). “Wow! i have six Fingers!” : Would You accept structural changes of Your hand in Vr? *Frontiers in Robotics and AI*, 3:27. 56
- HU, H. H., GOOCH, A. A., CREEM-REGEHR, S. H. et THOMPSON, W. B. (2002). Visual cues for perceiving distances from objects to surfaces. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 11(6):652–664. 48
- HU, L., SAITO, S., WEI, L., NAGANO, K., SEO, J., FURSUND, J., SADEGHI, I., SUN, C., CHEN, Y.-C. et LI, H. (2017). Avatar digitization from a single image for real-time rendering. *ACM Trans. Graph.*, 36(6):195 :1–195 :14. 145
- HUDSON, I. et HURTER, J. (2016). Avatar Types Matter : Review of Avatar Literature for Performance Purposes. *In LACKEY, S. et SHUMAKER, R., éditeurs : Virtual, Augmented and Mixed Reality : 8th International Conference, VAMR 2016, Held as Part of HCI International 2016, Toronto, Canada, July 17-22, 2016. Proceedings*, pages 14–21. Springer International Publishing, Cham. 66
- 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. 40
- JO, D., KIM, K., WELCH, G. F., JEON, W., KIM, Y., KIM, K.-H. et KIM, G. J. (2017). The impact of avatar-owner visual similarity on body ownership in immersive virtual reality. *In Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST ’17, pages 77 :1–77 :2, New York, NY, USA. ACM. 117

- JOHNSON, R. D. et DOWNING, L. L. (1979). Deindividuation and valence of cues : Effects on prosocial and antisocial behavior. *Journal of Personality and Social Psychology*, 37(9):1532. 64
- KALLINEN, K., SALMINEN, M., RAVAJA, N., KEDZIOR, R. et SÄÄKSJÄRVI, M. (2007). Presence and emotion in computer game players during 1st person vs. 3rd person playing view : Evidence from self-report, eye-tracking, and facial muscle activity data. *In Proceedings of the 10th International Workshop on Presence*, pages 187–190, Barcelona, Spain. Citeseer. 29, 46
- KELLY, J. W., HAMMEL, W. W., SIEGEL, Z. D., SJOLUND, L. et OTHERS (2014). Recalibration of perceived distance in virtual environments occurs rapidly and transfers asymmetrically across scale. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 20(4):588–595. 48, 95, 98
- KILTENI, K., BERGSTROM, I. et SLATER, M. (2013). Drumming in immersive virtual reality : the body shapes the way we play. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 19(4):597–605. 41, 65, 89, 144
- KILTENI, K., GROTEN, R. et SLATER, M. (2012). The sense of embodiment in virtual reality. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 21(4):373–387. 19, 37, 38, 51, 68, 75, 76, 78, 93, 117, 129
- KNAPP, J. M. et LOOMIS, J. M. (2004). Limited Field of View of Head-mounted Displays is Not the Cause of Distance Underestimation in Virtual Environments. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 13(5):572–577. 48, 98
- KOKKINARA, E., KILTENI, K., BLOM, K. J. et SLATER, M. (2016). First Person Perspective of Seated Participants Over a Walking Virtual Body Leads to Illusory Agency Over the Walking. *Scientific Reports*, 6:28879. 40
- KOKKINARA, E. et SLATER, M. (2014). Measuring the effects through time of the influence of visuomotor and visuotactile synchronous stimulation on a virtual body ownership illusion. *Perception*, 43(1):43–58. 41, 109, 142
- LAHA, B., BAIENSON, J. N., WON, A. S. et BAILEY, J. O. (2016). Evaluating Control Schemes for the Third Arm of an Avatar. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 25(2):129–147. 56
- LARSSON, P., VÄSTFJÄLL, D. et KLEINER, M. (2001). The actor-observer effect in virtual reality presentations. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2):239–246. 81, 82

- LATOSCHIK, M. E., LUGRIN, J.-L. et ROTH, D. (2016). Fakemi : A fake mirror system for avatar embodiment studies. *In Proceedings of the 22Nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology, VRST '16*, pages 73–76, New York, NY, USA. ACM. 55, 62
- LATOSCHIK, M. E., ROTH, D., GALL, D., ACHENBACH, J., WALTEMATE, T. et BOTSCH, M. (2017). The effect of avatar realism in immersive social virtual realities. *In Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '17*, pages 39 :1–39 :10, New York, NY, USA. ACM. 42, 143
- LEE, J., MOON, S.-E., CHEON, M. et LEE, J.-S. (2015). EEG Analysis on 3D Navigation in Virtual Realty with Different Perspectives. *In Proceedings of the 3rd International Conference on Human-Agent Interaction, HAI '15*, pages 227–229, New York, NY, USA. ACM. 87
- LEE, K. M. (2004). Presence, explicated. *Communication Theory*, 14(1):27–50. xxvii, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 68, 75, 76, 78, 81
- LENGGENHAGER, B., MOUTHON, M. et BLANKE, O. (2009). Spatial aspects of bodily self-consciousness. *Consciousness and cognition*, 18(1):110–117. 38, 51
- LENGGENHAGER, B., TADI, T., METZINGER, T. et BLANKE, O. (2007). Video Ergo Sum : Manipulating Bodily Self-Consciousness. *Science*, 317(5841):1096–1099. 38, 39, 51
- LEROY, L. (2009). *Stereoscopic picture processing with wavelet transform fo an adapted stereoscopic vision* . Theses, École Nationale Supérieure des Mines de Paris. 48
- LESSITER, J., FREEMAN, J., KEOGH, E. et DAVIDOFF, J. (2001). A cross-media presence questionnaire : The ITC-Sense of Presence Inventory. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3):282–297. 81, 82, 83
- LIKERT, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology*. 80
- LIM, S. et REEVES, B. (2009). Being in the game : Effects of avatar choice and point of view on psychophysiological responses during play. *Media Psychology*, 12(4):348–370. 29, 46
- LIN, J. J. et PARKER, D. E. (2007). User experience modeling and enhancement for virtual environments that employ wide-field displays. *In International Conference on Digital Human Modeling*, pages 423–433. Springer. 23, 24
- LIN, L. et JÖRG, S. (2016). Need a Hand? : How Appearance Affects the Virtual Hand Illusion. *In Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception, SAP '16*, pages 69–76, New York, NY, USA. ACM. 58

- 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. xxvii, 25, 30, 31, 32
- LOMBARD, M., DITTON, T. B. et WEINSTEIN, L. (2009). Measuring presence : the temple presence inventory. *In Proceedings of the 12th Annual International Workshop on Presence*, pages 1–15, Los Angeles, California, USA. 81, 83
- LONGO, M. R., SCHÜÜR, F., KAMMERS, M. P., TSAKIRIS, M. et HAGGARD, P. (2008). What is embodiment ? a psychometric approach. *Cognition*, 107(3):978–998. 84
- LUCAS, G., SZABLOWSKI, E., GRATCH, J., FENG, A., HUANG, T., BOBERG, J. et SHAPIRO, A. (2016). The effect of operating a virtual doppleganger in a 3d simulation. *In Proceedings of the 9th International Conference on Motion in Games*, MIG '16, pages 167–174, New York, NY, USA. ACM. 59, 66, 143
- LUGRIN, J., LATT, J. et LATOSCHIK, M. E. (2015). Avatar anthropomorphism and illusion of body ownership in vr. *In 2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, pages 229–230. 63
- LUGRIN, J.-L., POLYSCHIEV, I., ROTH, D. et LATOSCHIK, M. E. (2016). Avatar Anthropomorphism and Acrophobia. *In Proceedings of the 22Nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '16, pages 315–316, New York, NY, USA. ACM. 65, 144
- MACDORMAN, K. F., GREEN, R. D., HO, C.-C. et KOCH, C. T. (2009). Too real for comfort ? Uncanny responses to computer generated faces. *Computers in Human Behavior*, 25(3): 695–710. 62, 117, 129
- MANSOUR, S., EL-SAID, M., RUDE-PARKINS, C. et NANDIGAM, J. (2006). The interactive effect of avatar visual fidelity and behavioral fidelity in the collaborative virtual reality environment on the perception of social interaction. *WSEAS Transactions on Communications*, 5(8):1501. 55
- MASELLI, A. et SLATER, M. (2013). The building blocks of the full body ownership illusion. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(83). 41, 42, 51, 52, 93, 109
- MASELLI, A. et SLATER, M. (2014). Sliding perspectives : dissociating ownership from self-location during full body illusions in virtual reality. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8:693. 42, 51
- MCCREERY, M. P., SCHRADER, P. G., KRACH, S. K. et BOONE, R. (2013). A sense of self : The role of presence in virtual environments. *Computers in Human Behavior*, 29(4):1635–1640. 17

- MCDONNELL, R., BREIDT, M. et BÜLTHOFF, H. H. (2012). Render me real ? : Investigating the effect of render style on the perception of animated virtual humans. *ACM Trans. Graph.*, 31(4):91 :1–91 :11. 62
- MCMAHAN, A. (2003). Immersion, engagement and presence. *The video game theory reader*, pages 67–86. 27, 57
- MESSINGER, P. R., GE, X., STROULIA, E., LYONS, K., SMIRNOV, K. et BONE, M. (2008). On the relationship between my avatar and myself. *Journal For Virtual Worlds Research*, 1(2). 17
- METZINGER, T. (2009). *The ego tunnel : The science of the mind and the myth of the self*. Basic Books (AZ). xxi, 41
- MINSKY, M. (1980). Telepresence. *Omni*, pages 44–51. 25
- MOHLER, B. J., BÜLTHOFF, H. H., THOMPSON, W. B. et CREEM-REGEHR, S. H. (2008). A Full-body Avatar Improves Egocentric Distance Judgments in an Immersive Virtual Environment. In *Proceedings of the 5th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, pages 194–194, New York, NY, USA. ACM. 48
- MOHLER, B. J., CREEM-REGEHR, S. H., THOMPSON, W. B. et BÜLTHOFF, H. H. (2010). The Effect of Viewing a Self-Avatar on Distance Judgments in an HMD-Based Virtual Environment. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 19(3):230–242. 48
- MORI, M. (1970). Bukimi no tani [The uncanny valley]. *Energy*, pages 33–35. xxii, 60, 61, 63
- MORI, M., MACDORMAN, K. F. et KAGEKI, N. (2012). The uncanny valley [from the field]. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 19(2):98–100. xxii, 60, 61, 62, 63, 70, 117, 125, 129, 142
- MORIE, J. F. (2008). The performance of the self and its effect on presence in virtual worlds. In *Proceedings of the 11th Annual International Workshop on Presence*, pages 265–269. 18
- NAGAMINE, S., HAYASHI, Y., YANO, S. et KONDO, T. (2016). An immersive virtual reality system for investigating human bodily self-consciousness. In *2016 Fifth ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC)*, pages 97–100, Nakhon Pathom. 40
- NORMAND, J.-M., GIANNOPOULOS, E., SPANLANG, B. et SLATER, M. (2011). Multisensory stimulation can induce an illusion of larger belly size in immersive virtual reality. *PloS one*, 6(1):1–11. 41

- NOWAK, K. L. et FOX, J. (2018). Avatars and computer-mediated communication : a review of the definitions, uses, and effects of digital representations. *Review of Communication Research*, 6:30–53. 15
- OLIVÉ, I. et BERTHOZ, A. (2012). Combined induction of rubber-hand illusion and out-of-body experiences. *Frontiers in Psychology*, 3:128. 39
- OSGOOD, C. E., SAPORTA, S. et NUNNALLY, J. C. (1956). Evaluative assertion analysis. *Litera*, (3):47–102. 80
- 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*, 5:13899. 65
- PALLOT, M., EYNARD, R., POUSSARD, B., CHRISTMANN, O. et RICHIR, S. (2013). Augmented sport : Exploring collective user experience. In *Proceedings of the Virtual Reality International Conference : Laval Virtual, VRIC '13*, pages 4 :1–4 :8, New York, NY, USA. ACM. 23
- PARK, J. (2018). Emotional reactions to the 3d virtual body and future willingness : the effects of self-esteem and social physique anxiety. *Virtual Reality*, 22(1):1–11. 59, 117, 125
- PAVONE, E. F., TIERI, G., RIZZA, G., TIDONI, E., GRISONI, L. et AGLIOTI, S. M. (2016). Embodying Others in Immersive Virtual Reality : Electro-Cortical Signatures of Monitoring the Errors in the Actions of an Avatar Seen from a First-Person Perspective. *The Journal of Neuroscience*, 36(2):268–279. 87
- PECK, T. C., SEINFELD, S., AGLIOTI, S. M. et SLATER, M. (2013). Putting yourself in the skin of a black avatar reduces implicit racial bias. *Consciousness and cognition*, 22(3):779–787. 41
- PEÑA, J., HANCOCK, J. T. et MEROLA, N. A. (2009). The priming effects of avatars in virtual settings. *Communication Research*, 36(6):838–856. 64
- PERÉNY, É. (2013). *Images interactives et jeu vidéo : de l'interface iconique à l'avatar numérique*. Questions théoriques. 15
- PERÉNY, E. (2015). L'immersion avatariale : figurations co-opérables et visions habitées en situation de bilocation par externalisation de soi. In BERNARD, A., éditeur : *Immersivité de l'art. Interactions, imsertions, hybridations*, pages 77–88. Éditions L'Harmattan. 4

- PERÉNY, E., AMATO, E. A., GORISSE, G. et BERTHOZ, A. (2016). The Autoscopic Flying Avatar : A New Paradigm to Study Bilocated Presence in Mixed Reality. *In Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference, VRIC '16*, pages 31 :1–31 :3, New York, NY, USA. ACM. 87, 88
- PETKOVA, V. I. et EHRSSON, H. H. (2008). If I Were You : Perceptual Illusion of Body Swapping. *PloS one*, 3(12):1–9. 38, 51
- PETKOVA, V. I., KHOSHNEVIS, M. et EHRSSON, H. H. (2011). The perspective matters! Multisensory integration in ego-centric reference frames determines full-body ownership. *Frontiers in psychology*, 2(35). 38, 39, 51, 93
- PILLAI, J. S., SCHMIDT, C. et RICHIR, S. (2013). Achieving presence through evoked reality. *Frontiers in Psychology*, 4:86. 25, 33, 36
- RATAN, R. (2010). Self-presence, explicated. *In 60th Annual Conference of the International Communication Association*, pages 22–25. 76, 83
- RATAN, R. A. et HASLER, B. (2009). Self-presence standardized : Introducing the self-presence questionnaire (SPQ). *In Proceedings of the 12th Annual International Workshop on Presence*. 81
- RENNER, R. S., VELICHKOVSKY, B. M. et HELMERT, J. R. (2013). The perception of egocentric distances in virtual environments - a review. *ACM Comput. Surv.*, 46(2):23 :1–23 :40. 48
- ROSENBERG, M. (1965). The measurement of self-esteem. *Society and the adolescent self image*, 297:V307. xxviii, 119, 120, 187
- ROUSE III, R. (1999). What's Your Perspective? *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 33(3):9–12. 43, 48
- SALAMIN, P., TADI, T., BLANKE, O., VEXO, F. et THALMANN, D. (2010). Quantifying Effects of Exposure to the Third and First-Person Perspectives in Virtual-Reality-Based Training. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 3(3):272–276. 50, 89, 93
- SALAMIN, P., THALMANN, D. et VEXO, F. (2008). Improved Third-person Perspective : A Solution Reducing Occlusion of the 3PP? *In Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry, VRCAI '08*, pages 1–6, New York, NY, USA. ACM. 50

- SALAMIN, P., VEXO, F. et THALMANN, D. (2006). The Benefits of Third-person Perspective in Virtual and Augmented Reality? *In Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology - VRST '06*, pages 27–30, New York, NY, USA. ACM. xxvii, 48, 49, 50, 89
- SANCHEZ-VIVES, M. V., SPANLANG, B., FRISOLI, A., BERGAMASCO, M. et SLATER, M. (2010). Virtual Hand Illusion Induced by Visuomotor Correlations. *PLOS ONE*, 5(4):1–6. 41
- SCHUBERT, T., FRIEDMANN, F. et REGENBRECHT, H. (2001). The experience of presence : Factor analytic insights. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3):266–281. 81, 82
- SEYAMA, J. et NAGAYAMA, R. S. (2007). The uncanny valley : Effect of realism on the impression of artificial human faces. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 16(4):337–351. 62, 117, 125, 129
- SEYMOUR, M., EVANS, C. et LIBRERI, K. (2017a). Meet mike : Epic avatars. *In ACM SIGGRAPH 2017 VR Village*, SIGGRAPH '17, pages 12 :1–12 :2, New York, NY, USA. ACM. 54
- SEYMOUR, M., RIEMER, K. et KAY, J. (2017b). Interactive Realistic Digital Avatars- Revisiting the Uncanny Valley. *In Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences*. 63
- SHERIDAN, T. B. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1):120–126. 25, 78
- SHIN, D.-H., BIOCCA, F. et CHOO, H. (2013). Exploring the user experience of three-dimensional virtual learning environments. *Behaviour & Information Technology*, 32(2): 203–214. 23, 24
- SLATER, M. (1999). Measuring presence : A response to the Witmer and Singer presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5):560–565. 26, 27, 34, 82, 93
- SLATER, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B : Biological Sciences*, 364(1535):3549–3557. 34, 55

- SLATER, M., GUGER, C., EDLINGER, G., LEEB, R., PFURTSCHELLER, G., ANTLEY, A., GAU, M., BROGNI, A. et FRIEDMAN, D. (2006). Analysis of physiological responses to a social situation in an immersive virtual environment. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 15(5):553–559. 87
- SLATER, M., LOTTO, B., ARNOLD, M. M. et SÁNCHEZ-VIVES, M. V. (2009a). How we experience immersive virtual environments : the concept of presence and its measurement. *Anuario de psicología / The UB Journal of psychology*, 40(2):193–210. 26, 33, 35, 87
- SLATER, M., MARCOS, D. P., EHRSSON, H. et SANCHEZ-VIVES, M. V. (2009b). Inducing illusory ownership of a virtual body. *Frontiers in neuroscience*, 3:214–220. 41, 42, 55, 87
- SLATER, M., PÉREZ MARCOS, D., EHRSSON, H. et SANCHEZ-VIVES, M. (2008). Towards a digital body : the virtual arm illusion. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2(6). 41
- SLATER, M., SPANLANG, B., SANCHEZ-VIVES, M. V. et BLANKE, O. (2010). First person experience of body transfer in virtual reality. *PloS one*, 5(5):1–9. 39, 41, 42, 51, 52, 93, 109
- SLATER, M., USOH, M. et STEED, A. (1994). Depth of presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2):130–144. 25, 34, 81, 82
- SLATER, M., USOH, M. et STEED, A. (1995). Taking Steps : The Influence of a Walking Technique on Presence in Virtual Reality. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 2(3):201–219. 42
- SLATER, M. et WILBUR, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE) : Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6):603–616. 26, 93
- SPANLANG, B., NORMAND, J.-M., BORLAND, D., KILTENI, K., GIANNOPOULOS, E., POMÉS, A., GONZÁLEZ-FRANCO, M., PEREZ-MARCOS, D., ARROYO-PALACIOS, J., MUNCUNILL, X. N. et SLATER, M. (2014). How to Build an Embodiment Lab : Achieving Body Representation Illusions in Virtual Reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 1:9. 38
- STEPTOE, W., STEED, A. et SLATER, M. (2013). Human tails : ownership and control of extended humanoid avatars. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 19(4):583–590. 56
- TAKATALO, J., HÄKKINEN, J. et NYMAN, G. (2015). Understanding Presence, Involvement, and Flow in Digital Games. In BERNHAUPT, R., éditeur : *Game User Experience Evaluation*, pages 87–111. Springer International Publishing, Cham. 23

- TAYLOR, L. N. (2002a). Living Digitally : Embodiment in Virtual Worlds. In SCHROEDER, R., éditeur : *The Social Life of Avatars : Presence and Interaction in Shared Virtual Environments*, pages 40–62. Springer London, London. 16, 18
- TAYLOR, L. N. (2002b). Video games : Perspective, point-of-view, and immersion. Mémoire de D.E.A., University of Florida. 38, 43, 44, 48
- TCHA-TOKEY (2018). *Conception et évaluation de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Arts et Métiers. 20, 23, 24
- THIRIOUX, B., JORLAND, G., BRET, M., TRAMUS, M.-H. et BERTHOZ, A. (2009). Walking on a line : A motor paradigm using rotation and reflection symmetry to study mental body transformations. *Brain and cognition*, 70(2):191–200. 39
- THIRIOUX, B., MERCIER, M. R., JORLAND, G., BERTHOZ, A. et BLANKE, O. (2010). Mental imagery of self-location during spontaneous and active self–other interactions : An electrical neuroimaging study. *Journal of Neuroscience*, 30(21):7202–7214. 39, 87
- THOMPSON, W. B., WILLEMSSEN, P., GOOCH, A. A., CREEM-REGEHR, S. H., LOOMIS, J. M. et BEALL, A. C. (2004). Does the Quality of the Computer Graphics Matter when Judging Distances in Visually Immersive Environments. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 13(5):560–571. 48
- USOH, M., ARTHUR, K., WHITTON, M. C., BASTOS, R., STEED, A., SLATER, M. et BROOKS JR, F. P. (1999). Walking> walking-in-place> flying, in virtual environments. In *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, numéro SIGGRAPH '99, pages 359–364, New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 55
- VALLIERES, E. F. et VALLERAND, R. J. (1990). Traduction et validation canadienne-française de l'échelle de l'estime de soi de Rosenberg. *International Journal of Psychology*, 25(2):305–316. xxviii, 187
- VAN BAREN, J. et IJSSELSTEIJN, W. (2004). Measuring presence : A guide to current measurement approaches. *Deliverable of the OmniPres project IST-2001-39237*. 78
- VERHULST, A., NORMAND, J.-M., LOMBART, C., SUGIMOTO, M. et MOREAU, G. (2018). Influence of being embodied in an obese virtual body on shopping behavior and products perception in vr. *Frontiers in Robotics and AI*, 5:113. 65

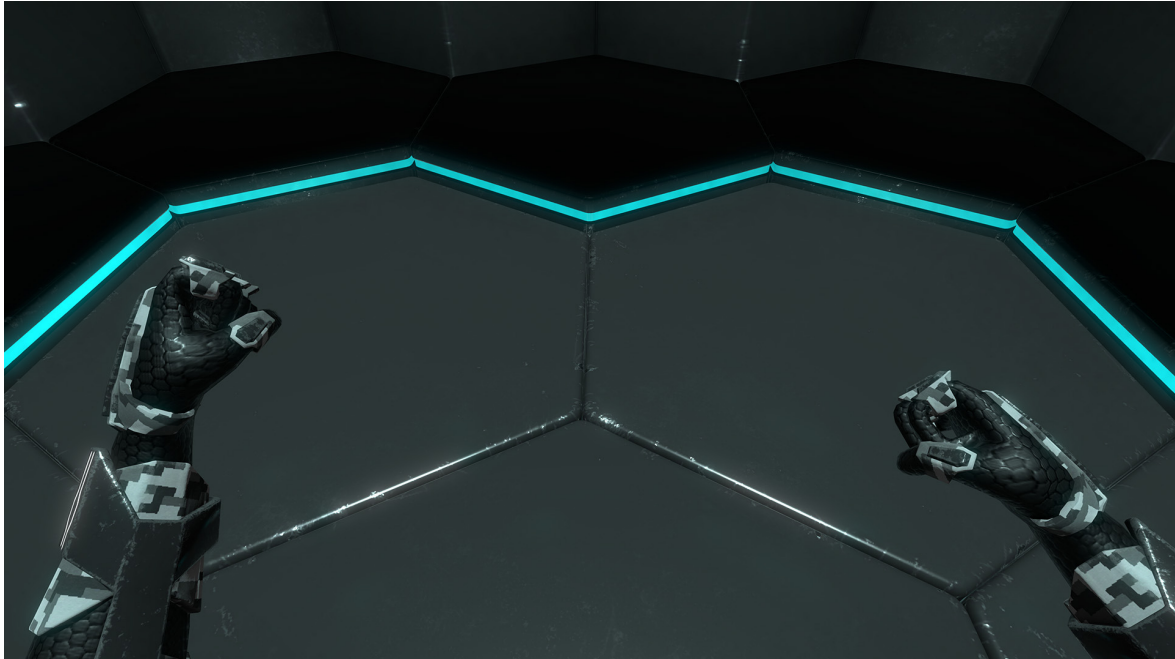
- VOLANTE, M., BABU, S. V., CHATURVEDI, H., NEWSOME, N., EBRAHIMI, E., ROY, T., DAILY, S. B. et FASOLINO, T. (2016). Effects of virtual human appearance fidelity on emotion contagion in affective inter-personal simulations. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 22(4):1326–1335. 58
- VORDERER, P., WIRTH, W., GOUVEIA, F. R., BIOCCA, F., SAARI, T., JÄNCKE, F., BÖCKING, S., SCHRAMM, H., GYSBERS, A., HARTMANN, T. et OTHERS (2004). MEC spatial presence questionnaire (MEC-SPQ) : Short documentation and instructions for application. *Report to the European Community, Project Presence : MEC (IST-2001-37661)*, 3. 81, 83, 84
- WAGES, R., GRNVOGEL, S. M. et GRTZMACHER, B. (2004). How realistic is realism ? Considerations on the aesthetics of computer games. *In International Conference on Entertainment Computing*, pages 216–225, Springer. 55
- WALTEMATE, T., GALL, D., ROTH, D., BOTSCH, M. et LATOSCHIK, M. E. (2018). The impact of avatar personalization and immersion on virtual body ownership, presence, and emotional response. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 24(4):1643–1652. 42, 59, 130, 142, 143
- WILLEMSSEN, P., COLTON, M. B., CREEM-REGEHR, S. H. et THOMPSON, W. B. (2004). The Effects of Head-mounted Display Mechanics on Distance Judgments in Virtual Environments. *In Proceedings of the 1st Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, pages 35–38, Los Angeles, California, USA. ACM. 48
- 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. 26, 27, 81, 82
- WON, A. S., BAIENSON, J., LEE, J. et LANIER, J. (2015). Homuncular flexibility in virtual reality. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 20(3):241–259. 56
- WU, W., AREFIN, A., RIVAS, R., NAHRSTEDT, K., SHEPPARD, R. et YANG, Z. (2009). Quality of experience in distributed interactive multimedia environments : Toward a theoretical framework. *In Proceedings of the 17th ACM International Conference on Multimedia*, MM '09, pages 481–490, New York, NY, USA. ACM. 23
- YEE, N. et BAIENSON, J. (2007). The Proteus effect : The effect of transformed self-representation on behavior. *Human communication research*, 33(3):271–290. 19, 64, 65, 70, 117, 130, 143

- YEE, N. et BAIENSON, J. N. (2009). The difference between being and seeing : The relative contribution of self-perception and priming to behavioral changes via digital self-representation. *Media Psychology*, 12(2):195–209. 64, 65
- YEE, N., BAIENSON, J. N. et DUCHENEAUT, N. (2009). The Proteus effect : Implications of transformed digital self-representation on online and offline behavior. *Communication Research*, 36(2):285–312. 64, 65, 130, 143
- ZELL, E., ALIAGA, C., JARABO, A., ZIBREK, K., GUTIERREZ, D., MCDONNELL, R. et BOTSCH, M. (2015). To stylize or not to stylize? : The effect of shape and material stylization on the perception of computer-generated faces. *ACM Trans. Graph.*, 34(6):184 :1–184 :12. 57, 62, 117, 120, 124

Annexe A

Annexes à l'expérimentation 1

A.1 Figures complémentaires



(a) Première personne



(b) Troisième personne

FIGURE A.1 – Point de vue à la première (A.1a) et à la troisième personne (A.1b).

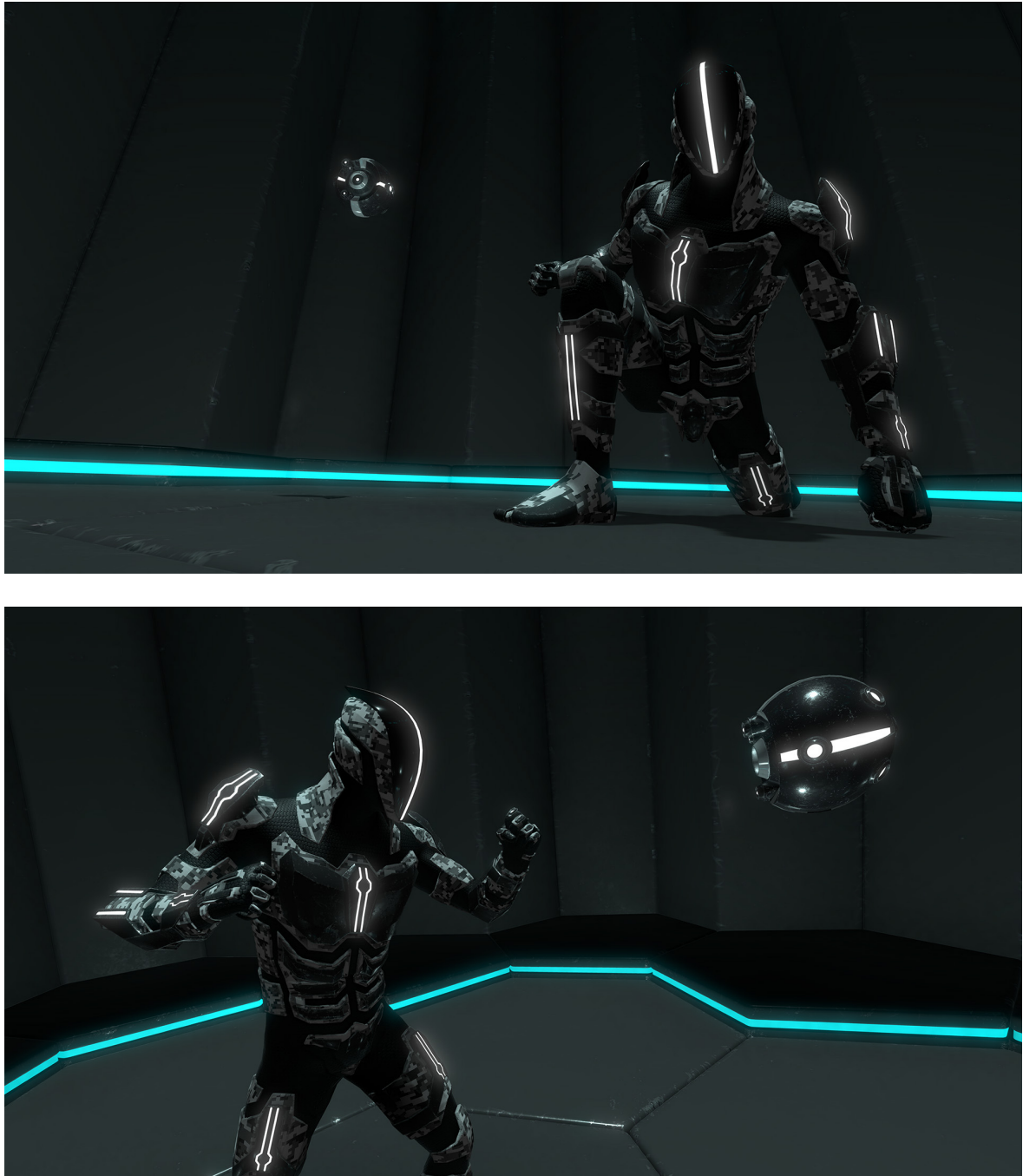
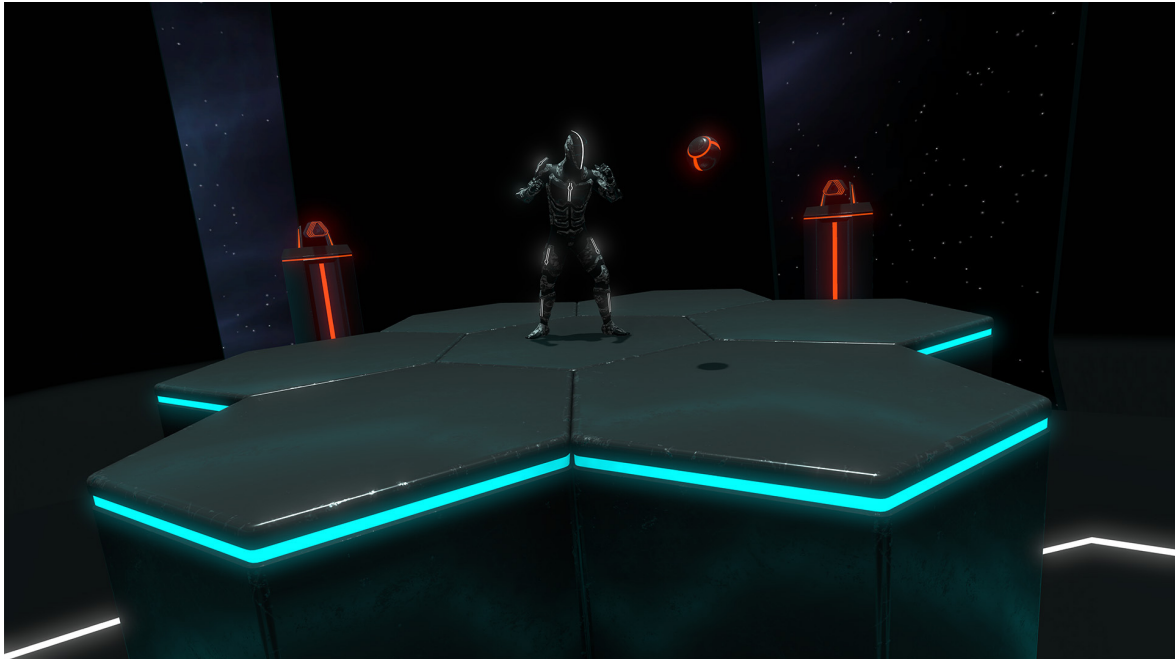
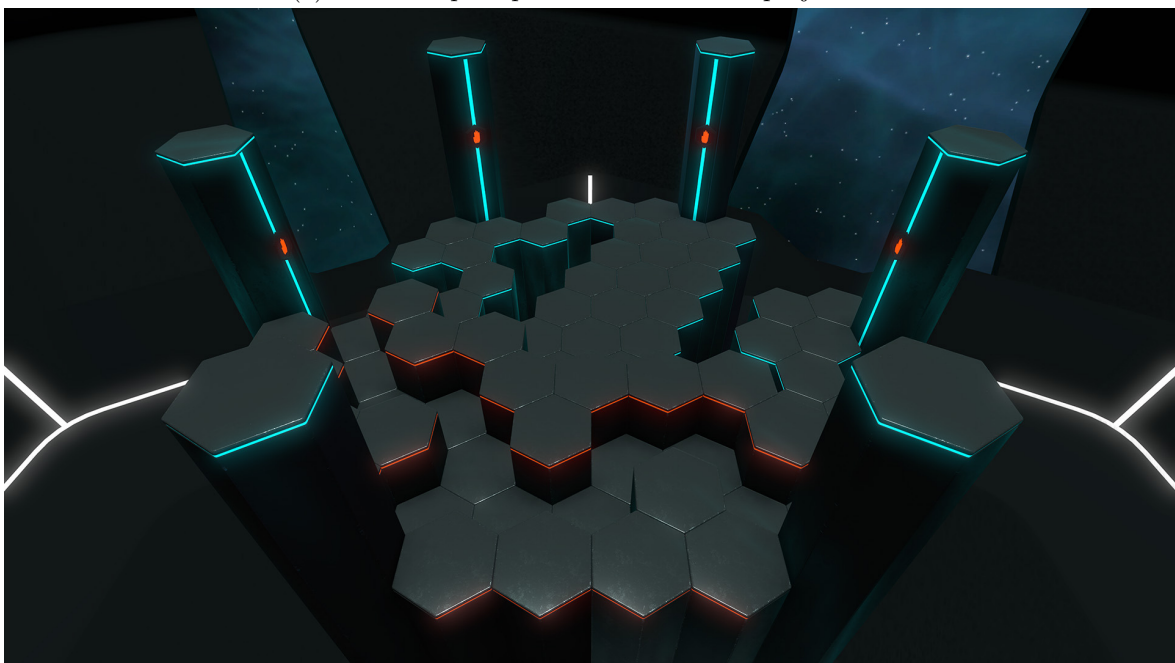


FIGURE A.2 – Illustration de l'avatar contrôlé par les utilisateurs lors de la phase d'accommodation.



(a) Tâche 1 : perception et déviation de projectiles.



(b) Tâche 2 : navigation et interaction avec des terminaux.

FIGURE A.3 – Illustration des tâches de l'expérimentation 1.



FIGURE A.4 – Combinaison sans fil Perception Neuron constitué de 32 capteurs inertiels (gyroscopes 3 axes, accéléromètres 3 axes et magnétomètres 3 axes) et cadencé à 60 Hz.

A.2 Guide d'entretien post-passation

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

ID	Questions
1	Comment qualifierais-tu l'expérience que tu viens de vivre ?.
2	As-tu ressenti un quelconque malaise (malade, gêne liée au matériel, etc.) ?
3	Quel point de vue t'a semblé le plus adapté lors des différentes tâches (sphère et navigation) ?
4	As-tu adopté une stratégie différente en fonction du point de vue ?
5	Durant l'expérience étais-tu encore conscient du monde réel ou avais-tu l'impression d'être « là-bas » dans l'environnement virtuel ?
6	As-tu d'autres remarques ?

Annexe B

Annexes à l'expérimentation 2.1

B.1 Figures complémentaires



FIGURE B.1 – Illustration de trois reconstructions de bustes optimisées (2.5K polygones) et intégrées dans l'application de réalité virtuelle dédiée à l'expérimentation.

B.2 Échelle de Rosenberg (EN/FR)

TABLEAU B.1 – Version originale de l'échelle de Rosenberg [1965].

ID	Questions				
1	On the whole, I am satisfied with myself.	1	2	3	4
2	At times I think I am no good at all.	1	2	3	4
3	I feel that I have a number of good qualities.	1	2	3	4
4	I am able to do things as well as most other people.	1	2	3	4
5	I feel I do not have much to be proud of.	1	2	3	4
6	I certainly feel useless at times.	1	2	3	4
7	I feel that I'm a person of worth, at least on an equal plane with others.	1	2	3	4
8	I wish I could have more respect for myself.	1	2	3	4
9	All in all, I am inclined to feel that I am a failure.	1	2	3	4
10	I take a positive attitude toward myself.	1	2	3	4
1 = Strongly disagree, 2 = Agree, 3 = Disagree, 4 = Strongly agree					

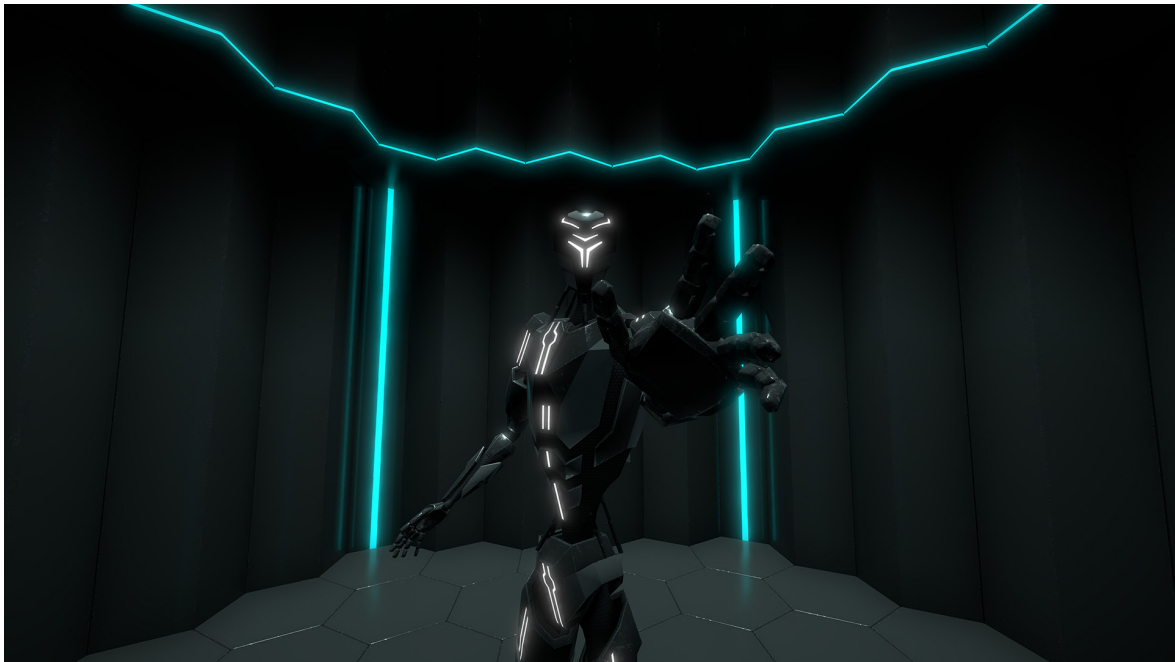
TABLEAU B.2 – Traduction française de l'échelle de Rosenberg [Vallieres et Vallerand, 1990].

ID	Questions				
1	Dans l'ensemble, je suis satisfait(e) de moi.	1	2	3	4
2	Parfois je me sens vraiment inutile.	1	2	3	4
3	Je pense que je possède un certain nombre de belles qualités.	1	2	3	4
4	Je suis capable de faire les choses aussi bien que la majorité des gens.	1	2	3	4
5	Je sens peu de raisons d'être fier(e) de moi.	1	2	3	4
6	Il m'arrive de penser que je suis un(e) bon(ne) à rien.	1	2	3	4
7	Je pense que je suis une personne de valeur, au moins égal(e) à n'importe qui d'autre.	1	2	3	4
8	J'aimerais avoir plus de respect pour moi-même.	1	2	3	4
9	Tout bien considéré, je suis porté(e) à me considérer comme un(e) raté(e).	1	2	3	4
10	J'ai une attitude positive vis-à-vis de moi-même.	1	2	3	4
1 = Tout à fait en désaccord, 2 = Plutôt en désaccord, 3 = Plutôt en accord, 4 = Tout à fait en accord					

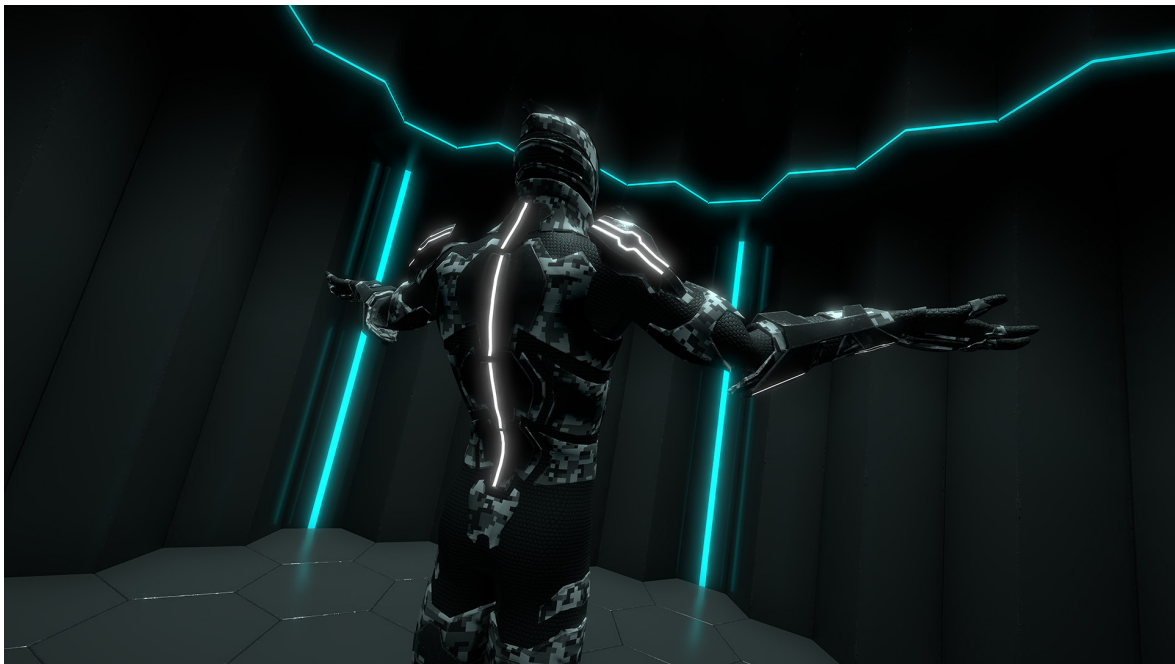
Annexe C

Annexes à l'expérimentation 2.2

C.1 Figures complémentaires

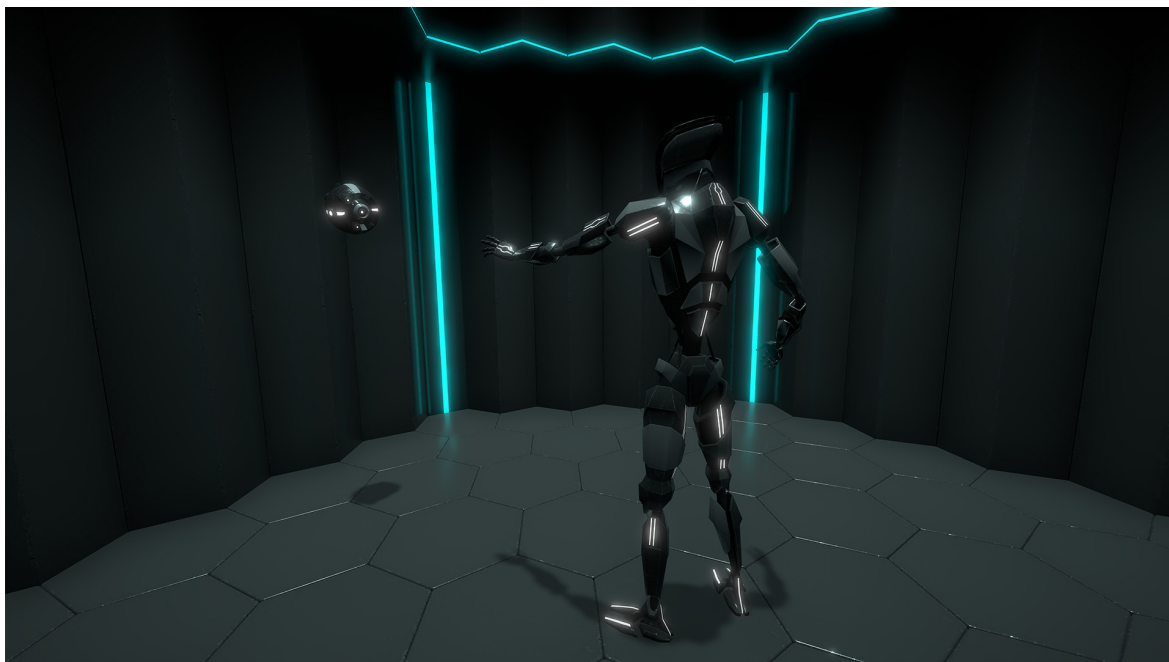


(a) Robot

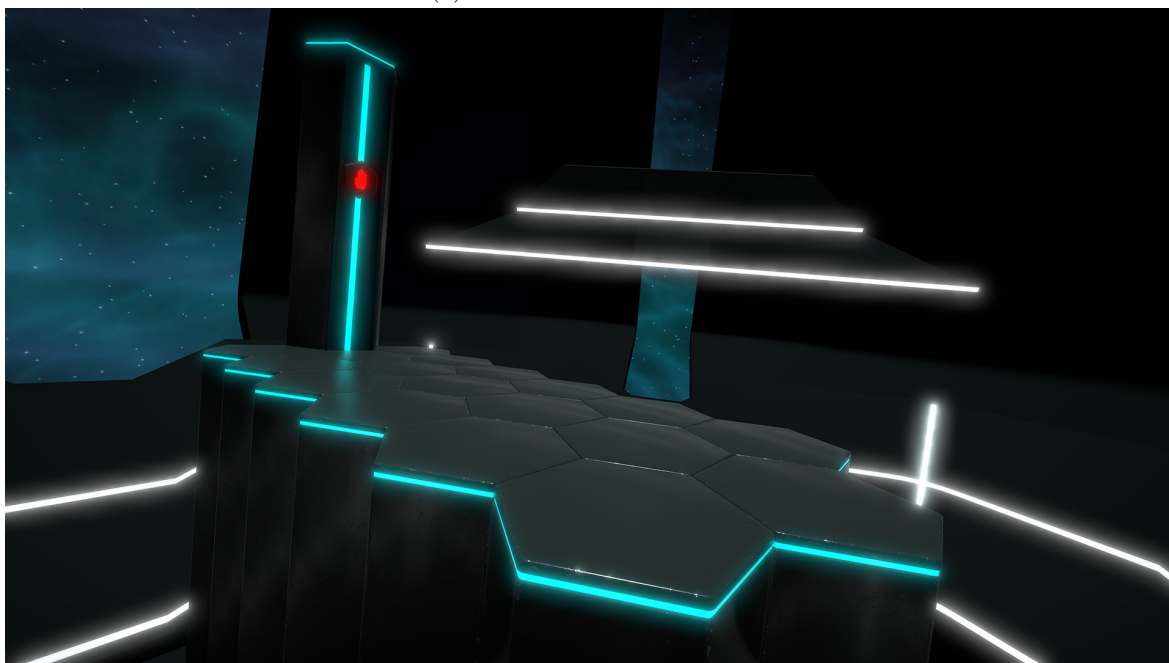


(b) Combinaison

FIGURE C.1 – Illustration du robot (C.1a) et de la combinaison (C.1b).

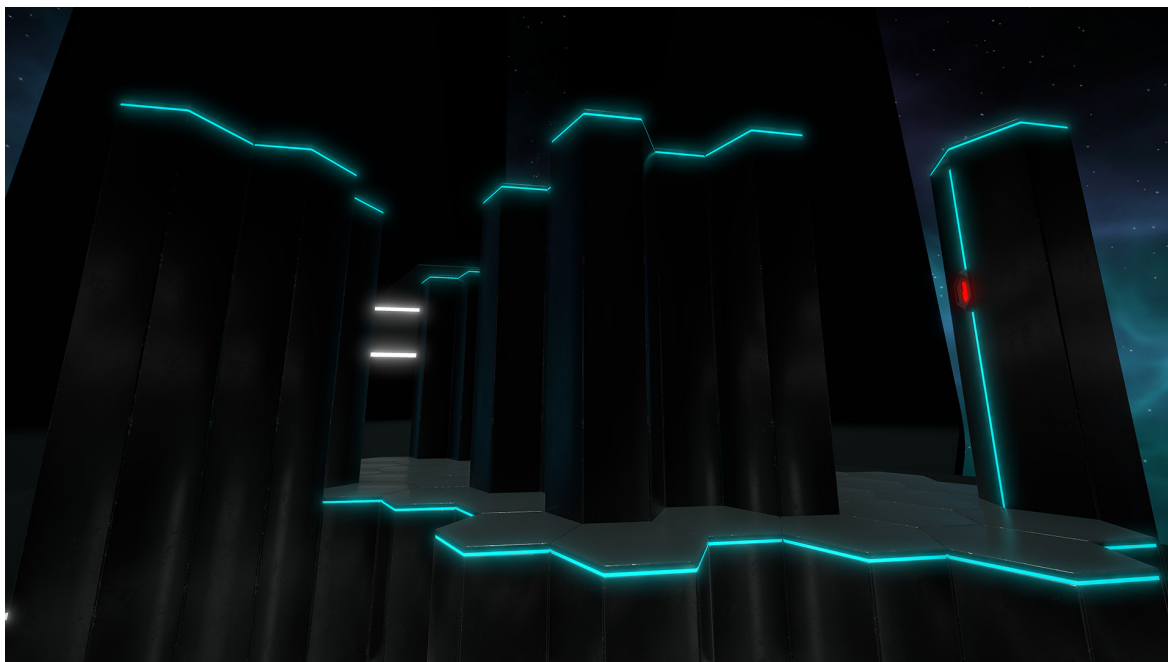


(a) Phase d'accommodation

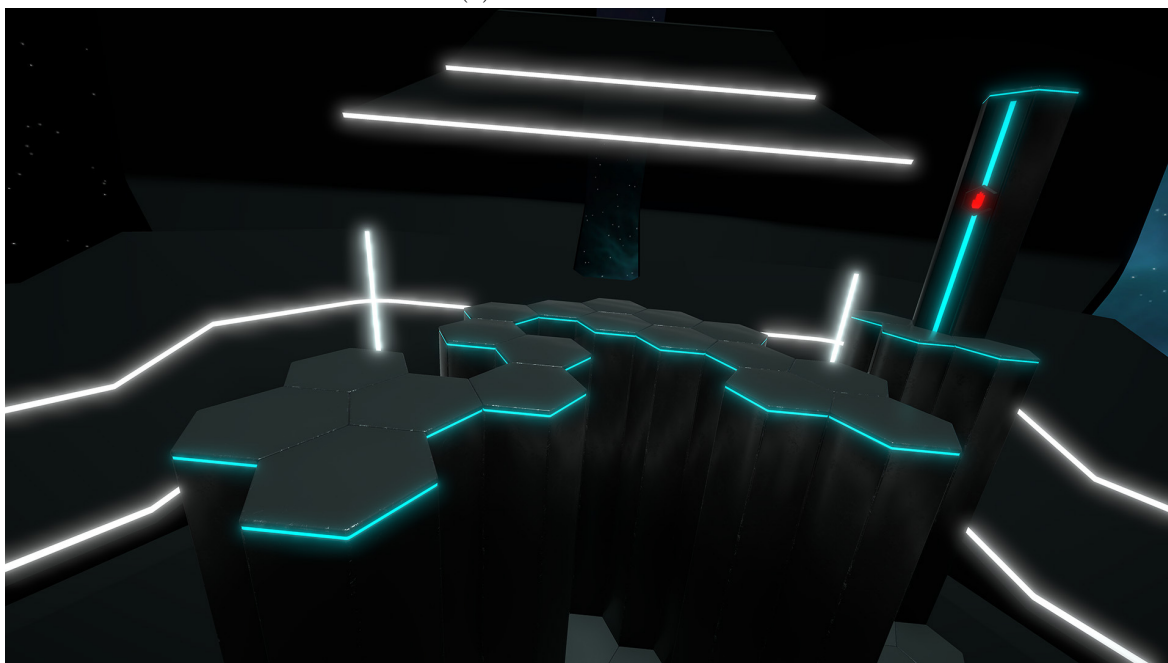


(b) Tâche 1 : pont

FIGURE C.2 – Configuration de l'arène virtuelle lors de la phase d'accommodation (C.2a) et de la tâche 1 (C.2b) de l'expérimentation 2.2.

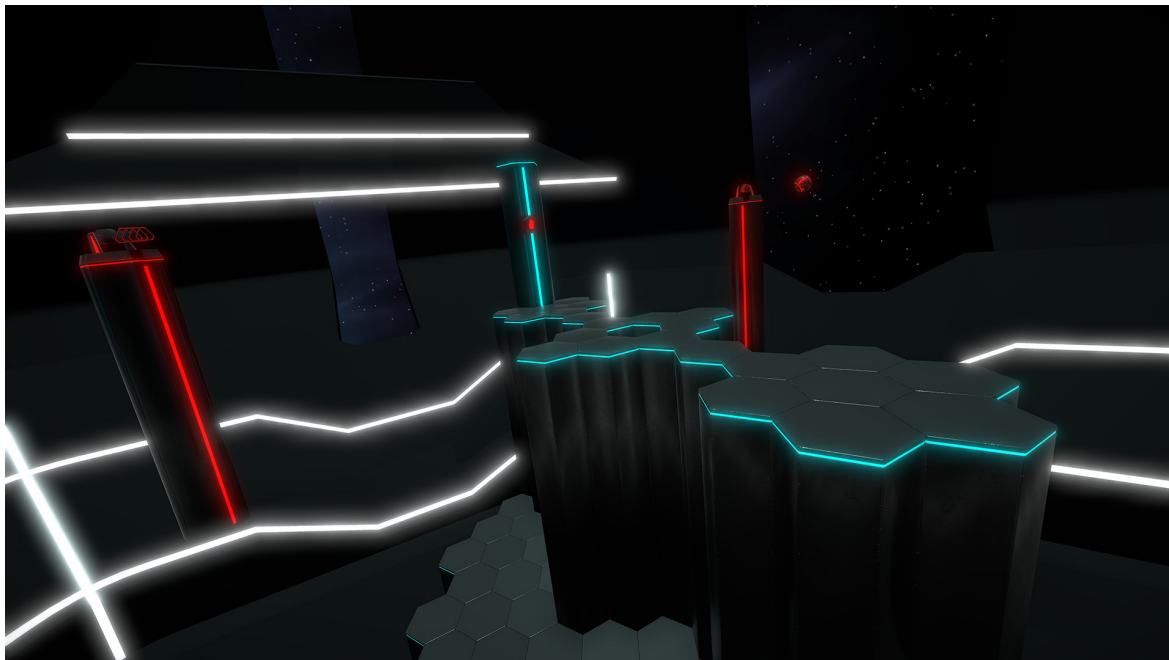


(a) Tâche 2 : corniches

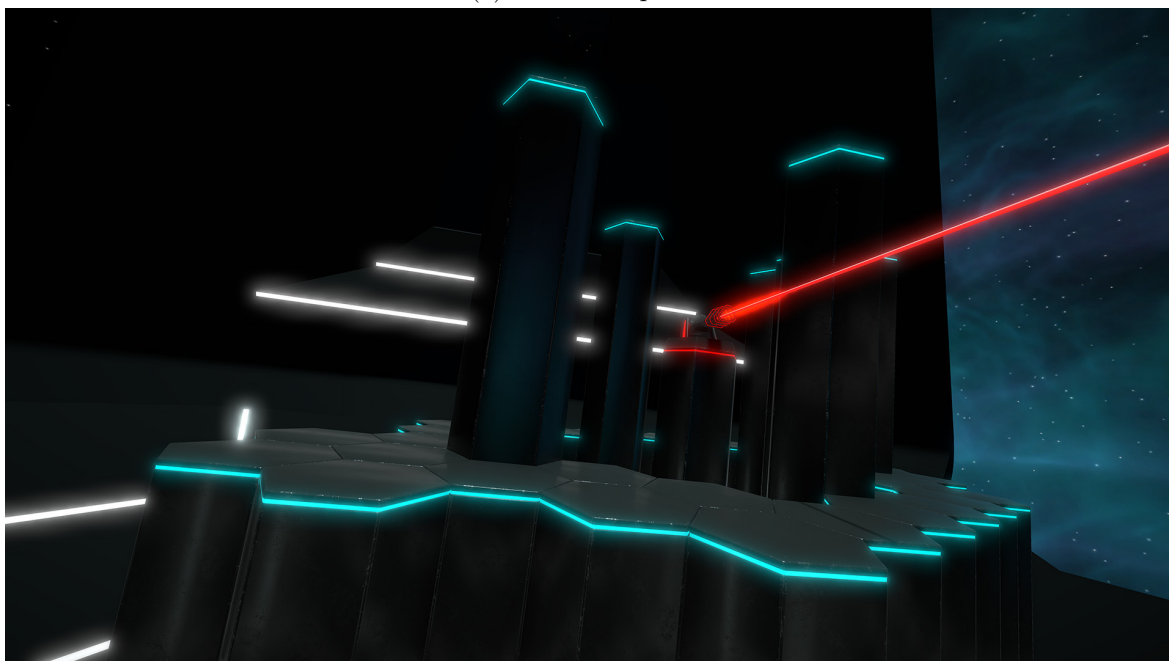


(b) Tâche 3 : pièges

FIGURE C.3 – Configuration de l'arène virtuelle lors des tâches 2 (C.3a) et 3 (C.3b) de l'expérimentation 2.2.



(a) Tâche 4 : sphères



(b) Tâche 5 : laser

FIGURE C.4 – Configuration de l'arène virtuelle lors des tâches 4 (C.4a) et 5 (C.4b) de l'expérimentation 2.2.



(a) Casque de réalité virtuelle HTC Vive et Vive Trackers.



(b) Adaptateur sans fil TP Cast.

FIGURE C.5 – Matériel dédié à l'expérimentation 2.2.



(a) Disposition de la salle d'expérimentation.



(b) Utilisateur en situation.

FIGURE C.6 – Configuration de l'espace physique (C.6a) et mise en situation d'un utilisateur (C.6b) lors de l'expérimentation 2.2.

C.2 Guide d'entretien post-passation

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

ID	Questions
1	Comment qualifierais-tu l'expérience que tu viens de vivre ?.
2	As-tu ressenti un quelconque malaise (malade, gêne liée au matériel, etc.) ?
3	Quel personnage as-tu préféré contrôler ?
4	As-tu eu l'impression de devenir ce personnage ?
5	Étais-tu principalement concentré/focalisé sur les événements de l'environnement virtuel ou avais-tu encore conscience du monde réel ?
6	As-tu adopté une stratégie différente lors des différents événements en fonction du personnage ?
7	As-tu d'autres remarques ?

IMPACT DU POINT DE VUE ET DE LA FIDÉLITÉ DES AVATARS SUR LES SENTIMENTS DE PRÉSENCE ET D'INCARNATION EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF

RESUME :

Les travaux entrepris dans le cadre de cette thèse de doctorat portent sur l'impact de différentes modalités perceptives et graphiques pouvant affecter l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif. Le positionnement de nos recherches s'inscrit dans un contexte où une majorité d'applications de réalité virtuelle reposent sur une reconduction de la vision à la première personne induisant un transfert naturel de nos mécanismes perceptifs. Cependant, il est fréquent que ces applications recourent à une représentation partielle, voire omettent l'intégration d'entités visuelles figurant la présence de l'utilisateur et limitant dès lors l'induction d'un sentiment d'incarnation au sein de l'environnement virtuel. Dans ce contexte, notre étude contribue à étendre les connaissances concernant l'influence du point de vue et de la fidélité visuelle des avatars sur l'expérience utilisateur. Sur un plan théorique, nos travaux proposent une articulation des notions de présence et d'incarnation au travers d'un méta-modèle reposant sur des intrications identifiées entre ces concepts lors de notre revue de littérature. Sur un plan expérimental, les trois études menées dans le cadre de nos recherches permettent d'identifier plusieurs facteurs impactant les sentiments de présence et d'incarnation, le comportement des utilisateurs, ainsi que les performances en ce qui concerne la navigation et les interactions. Notre première expérimentation démontre la possibilité d'avoir recours au point de vue à la troisième personne en réalité virtuelle tout en conservant un sentiment d'incarnation élevé. Nos résultats permettent également d'identifier les potentialités octroyées par les points de vue à la première et à la troisième personne en matière de perception, de navigation et d'interaction. Nous avons conduit par la suite une seconde étude portant sur la fidélité visuelle qui démontre l'impact positif de la similarité entre l'apparence des utilisateurs et celle de leur avatar sur l'évaluation de l'attractivité des modèles et sur le processus de sélection de personnages. Enfin, les résultats de notre troisième expérimentation démontrent l'impact positif de la véracité des avatars sur le sentiment d'incarnation, ainsi que son effet sur l'expérience subjective et le comportement des utilisateurs en environnement virtuel immersif.

Mots clés : Réalité virtuelle ; Avatar ; Présence ; Incarnation ; Point de vue ; Fidélité visuelle.

IMPACT OF VIEWPOINT AND OF AVATAR FIDELITY ON THE SENSES OF PRESENCE AND EMBODIMENT IN IMMERSIVE VIRTUAL ENVIRONMENT

ABSTRACT:

The work undertaken in this doctoral thesis focuses on the impact of different perceptual and graphical modalities that can affect user experience in immersive virtual environment. Our research takes position in a context where a majority of virtual reality applications are based on a first-person perspective leading to a natural transfer of our perceptual mechanisms. However, these applications often use partial representation or even omit the integration of visual entities representing the presence of the user and thus limiting the induction of a sense of embodiment within the virtual environment. In this context, our study contributes to expanding the knowledge concerning the influence of perspective and avatar visual fidelity on user experience. On a theoretical level, our work proposes an articulation of the notions of presence and embodiment through a meta-model based on intrications identified between these concepts during our literature review. On an experimental level, the three studies conducted as part of our research make it possible to identify several factors impacting the sense of presence and embodiment, user behavior and performance in terms of navigation and interaction. Our first experiment demonstrates the possibility of using a third-person perspective in virtual reality while maintaining a high sense of embodiment. Our results also make it possible to identify the potentialities enabled by first- and third-person in terms of perception, navigation and interaction. Afterward, we conducted a second study on visual fidelity that demonstrates the positive impact of the similarity between users' appearance and that of their avatar on the evaluation of models' attractiveness and on the character selection process. Finally, the results of our third experiment demonstrate the positive impact of avatars' truthfulness on the sense of embodiment, as well as its effect on the subjective experience and behavior of users in immersive virtual environment.

Keywords: Virtual Reality; Avatar; Presence; Embodiment; Perspective; Visual Fidelity.

