



HAL
open science

Vers un modèle unifié de la présence spatiale et de ses facteurs : application à l'étude de la téléprésence en environnements immersifs

Nawel Khenak

► To cite this version:

Nawel Khenak. Vers un modèle unifié de la présence spatiale et de ses facteurs : application à l'étude de la téléprésence en environnements immersifs. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Paris-Saclay, 2020. Français. NNT : 2020UPASG024 . tel-03098258

HAL Id: tel-03098258

<https://theses.hal.science/tel-03098258>

Submitted on 5 Jan 2021

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.

Vers un modèle unifié de la Présence
Spatiale et de ses facteurs :
application à l'étude de la Téléprésence
en environnements immersifs

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay

École doctorale n° 580, Science et technologie de l'information et de la
communication (STIC)

Spécialité de doctorat : Informatique

Unité de recherche : Université Paris-Saclay, CNRS, LIMSI, 91400, Orsay, France

Référent : Faculté des sciences d'Orsay

Thèse présentée et soutenue à Orsay, le 27 octobre 2020, par

Nawel Khenak

Composition du jury :

Daniel Mestre Directeur de recherche, Aix-Marseille Université (ISM)	Président et Rapporteur
Jean-Marie Burkhardt Directeur de recherche, Université Gustave Eiffel (IFSTTAR)	Rapporteur et Examineur
Frank Biocca Professeur, Institut de Technologie du New Jersey	Examineur
Sue Cobb Professeure associée, Université de Nottingham	Examinatrice
Wendy Mackay Directrice de recherche, Université Paris-Saclay (LRI)	Examinatrice
Patrick Bourdot Directeur de recherche, Université Paris-Saclay (LIMSI)	Directeur de thèse
Jeanne Vézien Ingénieur de recherche, Université Paris-Saclay (LIMSI)	Coencadrante et Examinatrice

Dédicaces

Ces dédicaces étant écrites après ma soutenance, je les commence par des remerciements à mon jury de thèse qui a bien voulu examiner mes travaux et dont la pertinence et l'intelligence des questions m'ont permis de réellement discuter mon travail. Je tiens également à remercier mes rapporteurs D. Mestre et J. Burkhardt qui ont accepté de lire ce manuscrit. Vos remarques m'ont permis de l'améliorer mais aussi de compléter ma présentation.

Je profite aussi de l'occasion pour remercier chaleureusement les équipes de Drone Arena et d'Illicity La Villette pour nous avoir permis d'administrer le questionnaire - élaboré en chapitre 4 - à leurs joueurs. Je remercie également l'équipe du FAST, en particulier, L. Auffray et M. Rabaud pour avoir si gentiment accepté de mettre à notre disposition leur grande halle, nous facilitant ainsi la mise en place de l'expérimentation décrite en chapitre 5.

Ainsi, énormément de personnes m'ont aidée au cours de cette expérience enrichissante mais difficile qu'est la thèse. En particulier, je tiens à remercier mon encadrante J. Vézien pour sa bienveillance et surtout sa confiance en moi durant ma thèse mais aussi durant mes deux stages de recherche. Cela m'a permis de mener mes travaux comme je l'entendais, toujours en prenant en compte ses remarques avisées. Merci également à N. Férey pour l'intérêt scientifique sincère qu'il a porté à mes travaux et pour sa générosité en terme de suggestions pertinentes. Merci à R. Di Vozzo de m'avoir accueilli au sein du Fablab Digiscope durant une grande partie de ma thèse. Les jours que j'y ai passés à mettre à profit mon expertise m'ont aidée à relâcher la pression, parfois très forte.

Bien évidemment, je tiens à remercier chaleureusement l'ensemble des doctorants de mon équipe VENISE qui m'ont tous encouragée, chacun à des étapes différentes de ma progression, et sans lesquels mon expérience au sein du laboratoire aurait été largement moins positive. Merci à Yujiro pour tous ses conseils bienveillants. Merci à Iuliia pour le temps qu'elle a consacré à tester chacune de mes expérimentations. Et surtout, merci à Yiran pour son aide et son soutien sans faille durant toute ma thèse.

Je remercie également mes parents et surtout ma mère pour sa présence (il fallait bien que je place le mot :p) au moment où j'en ai eu le plus besoin. Et pour finir, un grand merci à Nadji pour m'avoir conseillée, motivée et surtout pour avoir cru en moi pendant la totalité de ma thèse. Je te dédie mon titre de docteur.

Je clôture cette dédicace en remerciant sincèrement toutes les personnes qui ont consacré une partie de leur temps et de leur énergie à participer à mes expérimentations. Sans vous, cette thèse n'aurait tout simplement pas abouti.

TABLE DES MATIÈRES

1 De la (Télé)présence à la Présence Spatiale	15
1.1 Introduction et motivation	16
1.2 Origine de la présence	17
1.2.1 La télé-présence	17
1.2.2 La télé-existence	18
1.3 Définitions de la présence	19
1.3.1 La sensation d'être là	19
1.3.2 L'illusion de non-médiation	20
1.4 Dimensions de la présence	22
1.4.1 Présence de soi	22
1.4.2 Présence sociale	23
1.4.3 Présence spatiale	25
1.4.4 Entre la présence spatiale et sociale : la co-présence	27
1.5 Méthodes d'évaluation de la présence	28
1.5.1 Méthodes d'auto-évaluation	28
1.5.2 Mesures de performance	30
1.5.3 Mesures comportementales	32
1.5.4 Mesures physiologiques	35
1.5.5 Mesures psycho-cognitives	37
1.6 La présence spatiale dans différents environnements	39
1.6.1 Présence spatiale proximale	40

1.6.2	Présence spatiale distante	40
1.6.3	Présence spatiale virtuelle	40
1.6.4	Présence spatiale en réalité mixte	41
1.6.5	Comparaison entre les catégories	41
1.7	Conclusion	42
2	Conceptualisation de la Présence Spatiale	45
2.1	Introduction et motivation	46
2.2	Détermination des facteurs	47
2.2.1	L'approche technique	47
2.2.2	L'approche rationnelle	49
2.2.3	L'approche écologique	50
2.2.4	L'approche psychologique	52
2.3	Détermination des modèles	55
2.3.1	Les modèles techniques	56
2.3.2	Les modèles cognitifs	58
2.3.3	Les modèles multifactoriels	61
2.4	Notre modèle de la présence spatiale	63
2.4.1	Fidélité sensori-motrice	64
2.4.2	Caractéristiques psychologiques	64
2.4.3	Validité écologique	65
2.4.4	Facteurs négatifs	66
2.4.5	Autres formes de présence	66
2.4.6	Interactions des facteurs	67
2.5	Conclusion	67
3	Téléprésence et multisensorialité : Étude exploratoire	71
3.1	Introduction et motivation	72
3.2	Analyse des travaux existants	76
3.2.1	Évaluation de la présence spatiale	76
3.2.2	Évaluation de la multisensorialité	77
3.3	Conception, mise en place et déroulement de l'expérimentation	77
3.3.1	Conception de l'expérimentation	78
3.3.2	Mise en place de l'expérimentation	79
3.3.3	Design expérimental de l'expérimentation	83

3.3.4	Déroulement de l'expérimentation	84
3.4	Analyses statistiques et résultats	88
3.4.1	Effet d'interaction	88
3.4.2	Effet de la variable « environnement »	89
3.4.3	Effet de la variable « sensorialité »	90
3.4.4	Corrélation entre les mesures subjectives et objectives	93
3.5	Interprétation des résultats	94
3.5.1	Comparaison des rendus sensoriels	94
3.5.2	Comparaison des environnements	95
3.5.3	Corrélation des mesures subjectives et objectives	96
3.6	Conclusion et pistes d'amélioration	97
4	Questionnaire de présence spatiale pour les milieux immersifs	
	à destination de la communauté francophone	101
4.1	Introduction et motivation	102
4.2	Questionnaires existants	103
4.3	Méthodologie de développement d'un questionnaire	107
4.3.1	Construction d'un questionnaire	107
4.3.2	Validation d'un questionnaire	108
4.4	Construction du questionnaire	111
4.4.1	Construction de la structure	111
4.4.2	Génération des items	112
4.4.3	Traduction des items	113
4.4.4	Analyse et réduction des items	114
4.5	Validation du questionnaire	117
4.5.1	Expérimentation	117
4.5.2	Analyses statistiques	119
4.5.3	Résultats et discussion	120
4.6	Conclusion et nouvelles pistes	126
5	Réalité de l'environnement et présence spatiale : Étude comparative	131
5.1	Introduction et motivation	132
5.2	Conception, mise en place et déroulement de l'expérimentation	133
5.2.1	Conception de l'expérimentation	133
5.2.2	Mise en place de l'expérimentation	136

5.2.3	Design expérimental de l'expérimentation	140
5.2.4	Déroulement de l'expérimentation	142
5.3	Analyses statistiques et résultats	146
5.3.1	Effet des environnements sur le questionnaire subjectif SP-IE	147
5.3.2	Effet des environnements sur les mesures objectives	149
5.3.3	Corrélation entre les échelles subjectives de SP-IE et les mesures objectives de performance et de comportement	151
5.4	Discussion	152
5.4.1	Réponses subjectives au questionnaire SP-IE	152
5.4.2	Performance et comportement utilisateur	154
5.4.3	Corrélation entre les résultats subjectifs et objectifs	155
5.5	Conclusion	156
6	Élaboration d'un modèle unifié de la présence spatiale	161
6.1	Introduction et motivation	162
6.2	Apports expérimentaux	163
6.3	Notre modèle conceptuel de la présence spatiale	163
6.3.1	Facteurs du modèle	166
6.3.2	Relations entre facteurs de dimensions différentes	171
6.4	Conclusion	172
A	Unity 3D	207
A.1	Présentation du logiciel	208
A.1.1	L'interface graphique	209
A.2	Intérêts et forces du logiciel	209
A.2.1	Un asset store riche et accessible	209
A.2.2	Un développement multi-plateforme	210
A.2.3	Une communauté qui s'entraide	210
B	Processus technique de fabrication du masque	211
B.1	Configuration du masque	212
B.2	Fabrication du masque	212
C	Questionnaire SP-IE	215
D	Analyse du SP-IE : Données complémentaires	221

TABLE DES FIGURES

1.1	Couverture du livre Waldo illustrant le dispositif de tâche à distance.	17
1.2	TELESAR V - la cinquième génération de robots anthropomorphes de substitution de télé-existence. .	18
1.3	Interface expérimentale utilisée par les participants pour customiser leur avatar : Mii Channel (à gauche) et Wii fit (à droite) [1].	23
1.4	Plateforme « Horizon » développée par Facebook (images extraites de la vidéo de lancement).	24
1.5	Exemples de cas d'utilisation de la présence spatiale. Image du haut : interface immersive de contrôle à distance SACARI [2]. Image du milieu : cours sur la biologie moléculaire donné en RV par le professeur Eichacker lors de la conférence EdTech en 2017. Image du bas : application de RV pour la thérapie contre l'arachnophobie (image extraite de ce lien).	26
1.6	Illustration graphique de la relation entre la présence spatiale, la présence sociale et la co-présence. .	27
1.7	Image de gauche : un participant portant l'équipement constitué de lunettes stéréoscopiques, d'écouteurs et de gants vibro-tactiles et tenant un outil pour effectuer la tâche. Image de droite : point de vue du participant durant l'expérience : ses mains et l'outil sont co-localisés avec leurs homologues virtuels [3].	31
1.8	Représentation schématique de l'expérience de Maïano et al. [4]. Image de gauche : environnement virtuel immersif est généré dans une CAVE. Image de droite : un participant assis à l'intérieur de la CAVE, portant des lunettes avec filtres stéréo en train de contrôler ses déplacement dans l'environnement à l'aide d'un joystick.	33
1.9	Représentation d'un participant marchant entre deux murs virtuels [5].	34
1.10	Un participant portant un visiocasque et un équipement mesurant la fréquence cardiaque [6].	36

1.11	Vue d'ensemble de l'environnement virtuel. Image de gauche : configuration avec un degré d'immersion et de cohérence maximal : rendu avec illumination, ombres dynamiques et réflexion en temps réel. Image de droite : configuration de « mauvaise qualité » : ombrages simplifiés (Gouraud) et absence d'illumination et de réflexion [7].	37
1.12	Image de gauche : point de vue d'un participant situé dans un environnement représentant une performance de quatuor à cordes virtuel [8]. Image de droite : avatar d'un participant situé dans un environnement virtuel représentant un bar virtuel [9].	38
1.13	Classification de la présence spatiale en fonction de l'environnement auquel l'utilisateur est exposé.	42
2.1	Schéma récapitulatif de la relation entre la présence et performance et de l'influence des techniques d'interaction sur cette relation.	49
2.2	Image de gauche : un environnement de haute qualité visuelle (très immersif). Image de droite : la version « textuelle » du même environnement [10].	51
2.3	Deux images illustrant une attaque de dragon. L'image du haut est cohérente avec le scénario de l'environnement virtuel alors que la seconde est réaliste mais présente un faible niveau de cohérence car elle représente le monde réel.	53
2.4	Boucle de rétroaction explicitant la relation entre l'immersion, les ressources allouées, la présence et la performance [11].	57
2.5	Est-ce un canard ou un lapin ?	59
2.6	Modèle de localisation spatiale et d'hypothèses perceptives proposé par Wirth et al. [12]	61
2.7	Notre modèle de présence spatiale.	64
2.8	Facteurs liés à la fidélité sensori-motrice du système.	65
2.9	Facteurs liés aux différences individuelles.	65
2.10	Facteurs liés à la validité écologique de l'environnement.	66
2.11	Facteurs négatifs.	66
2.12	Facteurs liés aux autres formes de présence.	67
3.1	Vue d'ensemble en 3D des deux salles. (a) Cas « réel » : un participant se trouve dans la salle d'opération. (b) Cas « distant » : un participant se trouve dans la salle de téléopération et est « transporté » dans la salle d'opération via un système de RV. Les rectangles noirs dans la salle d'opération représentent les émetteurs de stimuli visuels et auditifs (tablettes fixées au murs).	78
3.2	Vue 360° de la salle d'opération.	79
3.3	Équipements du dispositif visuel. Image de gauche : la caméra panoramique Ricoh Theta-V 360°. Image de droite : le casque de réalité virtuelle HTC-Vive porté par les participants dans la salle de téléopération.	80

3.4	Masque en carton pour limiter le champ de vision des participants dans la salle d'opération.	81
3.5	Équipements du dispositif audio. Image de gauche : le microphone ambisonique Tetramic. Image de droite : le casque audio Closed Sennheiser HD 280.	82
3.6	Équipements du dispositif de suivi. Image de gauche : trois des six caméras de suivi installées dans la salle d'opération. Image de droite, un participant dans la salle d'opération portant les marqueurs infrarouges.	82
3.7	Image de gauche : le Leap Motion fixé sur le casque HTC. Image de droite, un participant dans la salle de téléopération portant la combinaison HTC+Leap et le casque audio.	83
3.8	(a, b) Participants durant l'expérimentation. (c, d) Leur point de vue à la première personne. (a, c) En condition <i>RÉEL</i> . (b, d) En condition <i>DISTANT</i>	85
3.9	Projection d'un point 3D sur l'un des murs de la salle d'opération.	87
3.10	Effet des conditions <i>RÉEL</i> et <i>DISTANT</i> sur chaque échelle de l'ITC-SOPI. Les diamants, les lignes à travers les boîtes et les points représentent respectivement la moyenne, la médiane et les valeurs maximum.	89
3.11	Effet des conditions <i>RÉEL</i> et <i>DISTANT</i> sur les mesures objectives. Les barres indiquent les écarts-types.	91
3.12	Effet des conditions <i>VISUEL</i> et <i>VISUEL+AUDIO</i> sur chaque échelle de l'ITC-SOPI. Les diamants, les lignes à travers les boîtes et les points représentent respectivement la moyenne, la médiane et les valeurs maximum.	92
3.13	Effet des conditions <i>VISUEL+AUDIO</i> et <i>VISUEL</i> sur les mesures objectives. Les barres indiquent les écarts-types.	93
4.1	Plan de développement du questionnaire.	110
4.2	Image de gauche : un drone situé dans le circuit de Drone Arena. Image de droite : des joueurs installés dans la salle de pilotage.	115
4.3	Image de gauche : un joueur lors d'une partie équipé de tout le système. Image de droite : vue en première personne du participant dans le circuit.	115
4.4	Image de gauche : mode solo. Image de droite : mode multijoueurs.	117
4.5	Toyland. Images de gauches : joueurs. Image de droite : interface.	118
4.6	Équipements du parc ILLUCITY. Image de gauche : casques HTC-Vive et leurs contrôleurs, sacs à dos MSI VR One et fusils. Image de droite : simulateur D-Box.	119
5.1	Fauteuils roulants électriques. Image de gauche : fauteuil réel. Image de droite : fauteuil virtuel.	134
5.2	Aperçu des obstacles. Image de gauche : configuration réelle. Image de droite : configuration virtuelle.	135
5.3	Panneaux. Image de gauche : réel. Image de droite : virtuel.	135

5.4	La halle expérimentale du FAST qui a servi de terrain d'expérimentation.	136
5.5	Aperçu 2D des deux zones de navigation et d'opération.	137
5.6	Photos illustrant l'agencement de l'espace. Image du haut : vue intérieure (sans les obstacles ni les panneaux de navigation) de la zone de navigation. Image du bas : zone d'opération.	138
5.7	La vue à la première personne d'un participant. Image de gauche : environnement réel. Image du milieu : environnement distant. Image de droite : environnement virtuel.	138
5.8	Le fauteuil équipé d'un microphone ambisonique, de marqueurs infrarouges, d'une caméra panoramique et d'un joystick.	141
5.9	Aperçu de la vue d'un participant dans les trois environnements. Image du haut : espace physique. Image de gauche : configuration à distance. Image de droite : configuration virtuelle.	142
5.10	Les trois chemins [PATH] empruntés par les participants.	143
5.11	Effet des environnements [ENV] sur les échelles du SP-IE. Le diamant, la ligne en travers de la boîte et les points représentent respectivement la moyenne, la médiane et les valeurs aberrantes.	147
5.12	Effet des environnements [ENV] sur les mesures de performance. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance.	149
5.13	Effet des environnements [ENV] sur la mesure de comportement. La barre d'erreur indique l'intervalle de confiance.	151
6.1	Modèle conceptuel de la présence spatiale simplifié composé des trois piliers : UTILISATEUR, SYSTÈME et ENVIRONNEMENT.	164
6.2	Modèle conceptuel de la présence spatiale intégrant les deux composantes « TACHE » et « SOCIAL ».	165
6.3	Composante « UTILISATEUR » du modèle.	167
6.4	Composante « SYSTÈME » du modèle.	168
6.5	Composante « ENVIRONNEMENT » du modèle.	169
6.6	Composante « TACHE » du modèle.	170
6.7	Composante « SOCIAL » du modèle.	170
6.8	Modèle conceptuel de la présence spatiale détaillé.	175
A.1	Interface graphique du logiciel Unity3D.	208
A.2	Unity Asset Store.	210
B.1	Diagramme résumant la procédure de calibration du masque.	212
B.2	Image de gauche : maquette du masque. Image de droite : pièces découpées du masque.	213
B.3	Image de gauche : maquette du masque. Image de droite : pièces découpées du masque.	213

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Résultats de l'analyse « ANOVA » sur chacune des mesures. L'astérisque (*) indique les données traitées selon la procédure de transformation de rang alignée.	89
3.2	Effet des conditions <i>RÉEL</i> et <i>DISTANT</i> sur chaque échelle de l'ITC-SOPI : moyennes (M) et écart-types (α).	90
3.3	Résultats du test « Wilcoxon Signed Rank » sur les quatre échelles de l'ITC-SOPI entre les conditions <i>RÉEL</i> et <i>DISTANT</i> . Les cases colorées en vert indiquent les valeurs statistiquement significatives.	90
3.4	Résultats des tests « Welch two-sample » (sur le SCORE et l'HÉSITATION) et « Wilcoxon signed-rank » (sur la FLUIDITÉ) entre les conditions <i>RÉEL</i> et <i>DISTANT</i> . Les cases colorées en vert indiquent les valeurs statistiquement significatives.	91
3.5	Effet des conditions <i>VISUEL</i> et <i>VISUEL+AUDIO</i> sur chaque échelle de l'ITC-SOPI : moyennes (M) et écart-types (α).	91
3.6	Résultats du test « Wilcoxon Signed Rank » sur les quatre échelles de l'ITC-SOPI entre les conditions <i>VISUEL+AUDIO</i> et <i>VISUEL</i> . Les cases colorées en vert indiquent les valeurs statistiquement significatives.	92
3.7	Résultats des tests « Welch two-sample » (sur le SCORE) et « Wilcoxon signed-rank » (sur l'HÉSITATION et la FLUIDITÉ) entre les conditions <i>VISUEL+AUDIO</i> et <i>VISUEL</i> . Les cases colorées en vert indiquent les valeurs statistiquement significatives.	93
4.1	Aperçu des questionnaires multidimensionnels de présence les plus utilisés dans la littérature.	104
4.2	Aperçu des questionnaires de présence les plus connus dans la littérature associés aux critères qu'ils satisfont.	106
4.3	Démographie des participants (A : aucune, D : débutant, I : Intermédiaire, E : expert)	116

4.4	Description des 12 jeux du parc Illucity choisis pour mener l'étude. Les jeux sont ordonnés en fonction de la taille de l'échantillon par ordre décroissant.	118
4.5	Valeurs seuils pour l'évaluation de la structure pendant les CFAs.	120
4.6	Résultats de la factorisation en axes principaux (FAP). Les valeurs acceptables sont colorées en vert. Les valeurs inférieures à 0.3 ont été omises.	121
4.7	Redéfinition de la structure du questionnaire.	123
4.8	Résultats de la première analyse factorielle confirmatoire (AFC1) : SFL pour chaque item, CR et AVE pour chaque échelle. Les valeurs non acceptables sont colorées en rouge.	124
4.9	Résultats de la deuxième analyse factorielle de confirmation (AFC2) : SFL pour chaque item et CR, AVE, coefficient α et corrélation de Pearson pour chaque échelle. Les valeurs acceptables sont colorées en vert.	125
4.10	Valeurs des indices d'ajustement après les AFCs (les valeurs acceptables sont colorés en vert).	125
5.1	Effet des environnements [ENV] sur les échelles du SP-IE : moyennes (M) et écart-types (α).	148
5.2	Résultats des tests de Wilcoxon Signed-Rank sur les six échelles du questionnaire. Les résultats statistiquement significatifs sont colorés en vert.	148
5.3	Tableau récapitulatif du résultat des hypothèses.	151
5.4	Corrélations Pearson entre les échelles du questionnaire et les mesures objective (no = aucune corrélation). Les corrélations > 0.3 sont colorées en vert.	152
D.1	Statistiques descriptives pour chaque échelle et item à partir des données recueillies lors des deux expériences « Réel vs. Distant » et « Drone Arena ».	222
D.2	Les valeurs des alphas de Cronbach et les corrélations de Pearson pour chaque dimension et item à partir des données recueillies lors des deux premières expériences « Réel vs. Distant » et « Drone Arena ». Les valeurs non acceptables sont colorées en rouge.	223
D.3	Statistiques descriptives pour chaque échelle et chaque item à partir des données recueillies lors de l'expérience « Illucity ».	225

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte et problématique

« L'explication des concepts joue un rôle majeur dans la réussite de la communication entre les chercheurs et est donc la clé de l'avancement de la science » [13].

Depuis plus de 30 ans, les technologies en robotique et en réalité virtuelle ont vu une progression fulgurante, les systèmes devenant de plus en plus pratiques et abordables notamment avec la démocratisation des visiocasques de réalité virtuelle à destination du grand public.

Une caractéristique importante de ces technologies est leur capacité à médiatiser/générer des « environnements » dans lesquels des utilisateurs peuvent se sentir « présents ». Cette **sensation de présence possédant l'avantage d'être une mesure applicable dans la comparaison de systèmes entièrement différents**, il y a eu très vite un besoin d'approfondir la compréhension de ce phénomène psycho-cognitif qui a été défini comme la sensation d'« être là ». Ce besoin s'est étendu pour inclure non seulement les chercheurs en robotique et en réalité virtuelle, mais aussi ceux en communication, en sciences cognitives, en psychologie et en sociologie. Ces chercheurs ont alors proposé de nouvelles définitions de la sensation de présence selon leurs disciplines de recherche et objectifs. En parallèle, le concept à évoluer pour inclure une constellation d'états psycho-cognitifs comme la sensation d'« être avec » ou la sensation d'« être ensemble ».

En conséquence à cette multi-disciplinarité et multi-dimensionalité grandissante, différentes formes de présence ont vu le jour. Parmi ces formes, la « **présence spatiale** » a particulièrement intéressée les chercheurs qui ont menés de nombreuses études dans le but de comprendre son processus de formation, de trouver des moyens valides de mesurer son intensité dans différents systèmes et d'apprendre à prédire sa variabilité selon l'utilisateur et l'environnement. En particuliers, les chercheurs ont souligné l'influence de différents facteurs dans l'émergence de cette

sensation sous formes de modèles conceptuels. Or, en raison de la confusion terminologique et théorique autour de la présence spatiale due à sa complexité et à la diversité des approches adoptées pour déterminer ses facteurs, ces modèles souffrent d'une opérationnalisation non systématique et incohérente du concept. Pourtant, trouver un consensus autour de la conceptualisation de la présence spatiale jouerait un rôle majeur dans la communication entre les chercheurs et permettrait de meilleures comparaisons entre les études.

Pour répondre à cette problématique, les travaux de cette thèse s'inscrivent dans une démarche de développement d'une **théorie unifiée de la présence spatiale** à travers la mise en lumière des différents facteurs intervenants dans sa formation.

Dans cette optique, la première étape de notre travail fut **l'élaboration d'un modèle conceptuel** qui prenne en compte les modèles existants. Ce modèle devra décrire de manière précise les facteurs jouant un rôle positif ou négatif dans l'émergence de la présence spatiale ainsi que les relations qui existent entre ces facteurs. Un intérêt particulier sera porté au facteur d'immersion, déterminée par la qualité, la richesse et la cohérence de chaque canal sensoriel utilisé par un système, en vu de son importance auprès des chercheurs en robotique et en réalité virtuelle. Ainsi, l'évaluation de la présence spatiale et de ses facteurs se fera dans différents environnements avec un degré élevé d'immersion.

Cette évaluation ne pourra correctement se faire qu'à l'aide de mesures permettant de quantifier la présence spatiale de manière fiable. Cette tâche peut s'avérer compliquée au regard de la nature subjective du phénomène¹. Par conséquent, il n'est pas surprenant que les outils les plus utilisés soient des questionnaires de présence subjectifs administrés à des utilisateurs, à l'issue d'une expérience consistant en leur passage au sein d'un environnement contrôlé. Cependant, d'autres outils plus objectifs existent, notamment l'analyse comportementale des utilisateurs lorsqu'ils se trouvent dans l'environnement. Néanmoins, la fiabilité de ces mesures pour jauger du degré de présence spatiale reste encore sujette à débat. La seconde étape de cette thèse consistera donc à **proposer des outils de mesure de la présence spatiale fiables et valides**, non seulement en combinant les approches subjectives et objectives déjà existantes dans la littérature, mais aussi en présentant de nouvelles mesures. En particulier, une partie de cette thèse sera dédiée au **développement d'un questionnaire pour la communauté francophone** dont le lien avec différentes mesures comportementales et de performance sera analysé.

La troisième étape de notre travail sera d'**évaluer la présence spatiale dans différents environnements immersifs**. Cela se fera au travers d'expérimentations où des utilisateurs devront accomplir des tâches de pointage ou de navigation en étant situés dans des environnements contrôlés. En outre, ces expériences permettront d'analyser l'influence de divers facteurs ainsi que leurs liens dans le but de faire évoluer notre modèle conceptuel. A ce stade de la thèse, une attention particulière sera portée aux **environnements immersifs distants** (réels) qui permettent d'engendrer la sensation de « **Téléprésence** ». Ces environnements ayant beaucoup moins été étudiés

1. La présence spatiale est une sensation de l'utilisateur, on parle aussi d'état mental. Il s'agit donc d'un phénomène subjectif, mais dont on veut évaluer les caractéristiques par une démarche scientifique objectivante.

que leurs homologues virtuels, notre objectif sera de mettre en avant certaines de leurs caractéristiques (comme l'existence de l'espace physique qu'ils médiatisent) et l'influence qu'elles ont sur la formation de la présence spatiale. Aussi, les résultats obtenus lors des différentes expérimentations permettront d'approfondir nos connaissances sur la présence spatiale et d'améliorer notre modèle pour le rendre le plus inclusif et détaillé possible.

Plan du manuscrit

Cette thèse est divisée en six chapitres.

Le **chapitre 1** présente le contexte autour de l'origine du concept de présence, ses définitions ainsi que les formes principales de présence qui existent, notamment la présence spatiale qui est détaillée de manière approfondie. Les différentes méthodes d'évaluation de la présence sont également décrites dans ce chapitre.

Le **chapitre 2** détaille les principales approches pour déterminer les facteurs de la présence spatiale, s'ensuit une analyse des modèles conceptuels qui existent dans la littérature. Le chapitre se conclut par la présentation d'une première version de notre modèle de présence spatiale.

Le **chapitre 3** décrit la première expérimentation que nous avons menée et qui consistait à comparer deux environnements, l'un réel et l'autre distant, restitués dans des conditions immersives (visuelles et auditives) très similaires. Le but de cette étude était d'évaluer le degré de présence spatiale engendré dans les deux environnements ainsi que l'impact de la multi-sensorialité sur l'expérience utilisateur.

Le **chapitre 4** retrace la procédure de développement de notre propre questionnaire pour évaluer la présence spatiale en environnements immersifs au sein de la communauté francophone.

Le **chapitre 5** présente une deuxième expérimentation où l'exécution d'une tâche de navigation dans un espace physique réel était comparée avec la même tâche effectuée dans le même espace à distance et dans une représentation virtuelle de cet espace. Les trois représentations étaient restituées dans des conditions visuelles, auditives et d'interaction quasiment identiques, le but étant d'évaluer la présence spatiale ainsi que son lien avec différents facteurs.

Le **chapitre 6** représente l'aboutissement des travaux menés durant cette thèse. Une version détaillée de notre modèle conceptuel y est présentée en tenant compte des résultats de nos travaux expérimentaux.

Le manuscrit se conclut par un récapitulatif des contributions de cette thèse et donne un aperçu des travaux futures.

———— CHAPITRE 1 ————

**DE LA (TÉLÉ)PRÉSENCE À LA PRÉSENCE
SPATIALE**

1.1 Introduction et motivation

La **présence** est un phénomène qui suscite la curiosité et l'intérêt des chercheurs depuis plus de trois décennies, en particulier dans le cadre des environnements virtuels et des systèmes de téléopération où elle est communément désignée comme « *la sensation d'être là* » [14, 15, 16, 17, 18, 11, 19]. Différentes études ont ainsi été menées afin de comprendre et d'expliquer son processus de formation. A travers ces études, la signification initiale de la sensation d'« être là » s'est élargie à de nombreux états psychologiques comme la sensation d'« être avec » ou d'« être ensemble » ce qui a donné lieu à l'émergence de nombreuses « formes » de présence.

Parmi ces formes, la « **présence spatiale** » est celle se rapprochant le plus de l'acception originelle. Elle a fait l'objet de nombreuses recherches visant à proposer une conceptualisation de sa formation sans qu'aucun consensus n'ait émergé jusqu'à présent. Cela est dû en partie aux différentes approches qui existent pour définir le concept et au manque de clarté quant à la relation entre ces dernières. L'objectif principal de cette thèse est d'établir un modèle conceptuel de la présence spatiale unifiant ces approches. Cependant, avant de pouvoir développer un tel modèle, il est primordiale de comprendre l'évolution de la conceptualisation de la présence à travers les différentes définitions qui lui ont été attribuées et les formes qui en ont découlées. C'est la raison pour laquelle nous présentons dans ce chapitre un état de l'art de cette évolution.

Objectifs et plan du chapitre

Dans le but d'appréhender la compréhension de la sensation de présence en général et celle de la présence spatiale en particulier, la première partie de ce chapitre passe en revue la littérature autour de l'origine de la présence et de ses définitions. Il décrit ensuite les différentes formes qui existent, principalement la présence de soi, la présence sociale et la présence spatiale.

Dans la deuxième partie du chapitre, les différentes méthodes d'évaluation subjectives (mesures d'auto-évaluation) et objectives (mesures de performance, comportementales, physiologiques et psycho-cognitives) de la présence sont présentées.

La présence spatiale étant le sujet principal de cette thèse, le chapitre se conclut par une description plus détaillée de cette dernière dans le contexte des différents environnements immersifs, à savoir les environnements naturels, distants, mixtes et virtuels. Cette démarche permet notamment de **clarifier la relation entre la présence spatiale et la téléprésence**, autre concept très utilisé dans le domaine, mais aussi de mettre en lumière des lacunes dans la recherche sur la présence spatiale.

1.2 Origine de la présence

Le terme « **présence** » a suscité beaucoup d'attention dans le milieu de la recherche en Réalité Virtuelle (RV) depuis 1992, date à laquelle Sheridan et Furness l'ont choisi dans le titre de leur nouvelle revue consacrée à l'étude des systèmes de réalité virtuelle et des téléopérations : « *Presence, Teleoperators and Virtual Environments* ». Cependant, son origine remonte au début des années 80 qui ont vu l'émergence de deux termes : la télé-présence et la télé-existence.

1.2.1 La télé-présence

Le terme **téléprésence** a été utilisé pour la première fois en 1980 par Minsky qui travaillait dans le domaine de la robotique, plus précisément dans le cadre des systèmes de téléopération. Il s'est notamment inspiré du roman de Heinlein « *Waldo* » paru en 1942 dans lequel l'auteur raconte l'histoire d'un garçon, prénommé Waldo, qui développe un dispositif de type maître-esclave pour effectuer des tâches à distance par « *reproduction de mouvements* » [20]. Le dispositif est constitué d'un gant et d'un harnais que Waldo porte et qui lui permettent de contrôler une main mécanique beaucoup plus puissante en bougeant simplement sa main et ses doigts (figure 1.1).

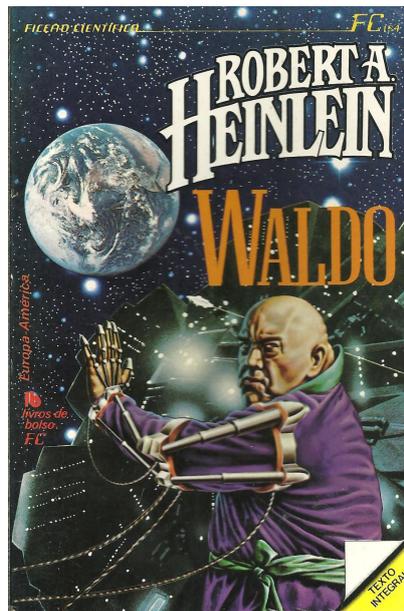


FIGURE 1.1 – Couverture du livre *Waldo* illustrant le dispositif de tâche à distance.

Prenant le roman comme exemple, Minsky [21] définit le terme de téléprésence pour la réalisation de tâches de manipulation à distance comme « *l'illusion d'être transporté via les systèmes de télécommunication vers un lieu réel, physique, qui pourrait alors être vécu de façon synchrone à distance* ». Peu après en 1983, Akin et al. [22] utilisent ce terme pour décrire la situation dans laquelle « *les manipulateurs ont la dextérité nécessaire pour permettre à l'opérateur d'exécuter des fonctions humaines normales* » et soutiennent que la sensation de téléprésence est

atteinte lorsque « *l'opérateur reçoit un retour sensoriel de qualité et en quantité suffisante* ». Par cette définition, ils soulignent d'une part, la possibilité que des (télé)opérateurs puissent ressentir une sensation de téléprésence dans les espaces de travail à distance médiatisés par la technologie et d'autre part, que des canaux sensori-moteurs de haute qualité sont d'une importance capitale dans l'émergence de cette sensation.

1.2.2 La télé-existence

En parallèle à l'introduction de la téléprésence, un concept assez proche a vu le jour dans un article publié par Tachi en 1985 [23]. Dans cet article, l'auteur s'est concentré sur l'étude de la sensation qu'éprouvaient des opérateurs pendant l'exécution d'une tâche de manipulation à distance via un système de **télé-existence**. Un peu plus tard, en 1990, il a défini la télé-existence comme « *un système permettant à un être humain d'avoir la sensation en temps réel d'être à un endroit autre que celui où il existe réellement et d'interagir avec l'environnement distant* » [24]. L'auteur a alors émis l'hypothèse que le fait de fournir à un opérateur cette sensation facilitait les tâches à distance.

Dans cette optique, divers systèmes ont été mis au point par des chercheurs du Tachi Lab¹, notamment le « TELESAR V », un robot anthropomorphe de substitution de télé-existence [25, 26]. Ce robot offre à son utilisateur la possibilité de voir, d'entendre et de sentir à la place du robot - qui se situe dans un endroit différent - en temps réel. Pour rendre cela possible, l'opérateur qui contrôle TELESAR V doit porter un casque de réalité virtuelle et des gants haptiques. Lorsque les doigts du robot touchent un objet, l'opérateur peut alors « sentir » la forme de l'objet (figure 1.2).



FIGURE 1.2 – TELESAR V - la cinquième génération de robots anthropomorphes de substitution de télé-existence.

Malgré la similitude des deux concepts², la téléprésence a été le terme le plus utilisé par les chercheurs en robotique qui l'ont entériné comme la sensation d'« *être transporté* » dans un lieu physique distant via la technologie. Au début des années 90, cette idée a été transposée à la RV où au lieu d'être transporté dans un environnement

1. <https://tachilab.org/en/index.html>

2. Un historique détaillé de la téléprésence et de la télé-existence est proposé respectivement dans [27] et [28].

physique distant, l'opérateur est projeté dans un environnement virtuel avec la sensation d'« être à l'endroit généré et représenté par les dispositifs virtuels » [29, 15].

Le terme « **présence** » utilisé comme abréviation pour téléprésence a donc été rapidement adopté par l'ensemble de la communauté scientifique et est passé de son sens initial de « *transport* » vers un lieu distant existant à celui d'« être là » dans un environnement virtuel, réel ou non [30, 31].

Au fil du temps, la présence est devenue un concept multidisciplinaire qui s'est étendu pour inclure non seulement les chercheurs en RV et en robotique, mais aussi ceux en médias et communication [32], en ingénierie industrielle [18], en sciences cognitives [33], en psychologie [34] et en sociologie [35]. Cette multi-disciplinarité grandissante du concept a mené à l'apparition de nouvelles définitions du concept selon les domaines respectifs des chercheurs et leurs objectifs.

1.3 Définitions de la présence

Même s'il n'existe pas aujourd'hui de définition unique et universelle de la présence, la grande majorité des définitions proposées dans la littérature peuvent se regrouper sous deux grandes catégories à savoir, les définitions axées sur **la sensation d'être là** et celles basées sur **l'illusion perceptive de non-médiation** (cette classification s'inspire de celle de Skarbez et al. [36]).

Dans ce qui suit, nous nous basons sur ces deux catégories pour présenter les définitions les plus répandues dans la littérature.

1.3.1 La sensation d'être là

Les définitions de cette catégorie ont énormément été influencées par le point de vue du célèbre psychologue américain James Jerome Gibson sur la présence : « *La présence peut être considérée comme l'expérience de son environnement physique ; elle ne se réfère pas à l'environnement tel qu'il existe dans le monde physique, mais à la perception de cet environnement par des processus mentaux automatiques et contrôlés* » [37].

En 1992, Steuer [30] introduit cette notion Gibsonienne de présence dans le domaine de l'informatique en définissant la téléprésence comme « *l'expérience de la présence dans un environnement au moyen d'un système de communication* ». Selon cette définition, la présence se réfère à la perception **naturelle** d'un environnement, et la téléprésence à la perception **médiatisée** d'un environnement. L'environnement peut être soit un environnement réel mais distant dans le temps ou dans l'espace, soit un environnement virtuel (synthétisé par un ordinateur) mais « inexistant » physiquement.

En parallèle, Sheridan [15] définit la présence comme la sensation d'être physiquement présent soit « *avec un ou plusieurs objets existants dans un site distant* » dans le cas de la téléopération, soit « *avec des affichages visuels, auditifs ou haptiques générés par un ordinateur* » dans le cas de la réalité virtuelle.

Ces définitions marquent le début d'une grande confusion entre la téléprésence en environnements distants et la présence virtuelle en environnements virtuels (de nombreux chercheurs ont été préoccupés principalement - ou seulement - par la présence dans des environnements virtuels). Nous reviendrons sur cette confusion dans le chapitre 3.

En 1993, Slater et al. [31, 38] définissent la présence en environnements virtuels comme « la sensation qu'ont les participants d'être ailleurs que là où ils se trouvent physiquement lorsqu'ils subissent les effets d'une simulation générée par ordinateur : *la sensation d'être là* »³. Cette définition a ensuite été reprise par de nombreux chercheurs [11, 40].

Biocca et al. [32, 41] quant à eux, définissent en 1997 la téléprésence comme « *la sensation d'être présent dans un environnement médiatisé (distant ou virtuel) différent de l'environnement physique environnant* » et la présence comme « *la sensation d'être là* », que « là » existe ou non dans l'espace physique. Par cette définition, les auteurs considèrent la téléprésence comme un cas particulier de la présence et associent le terme à l'utilisation de capteurs sensori-moteurs pour relier le corps du participant à un système robotique via des canaux de télécommunication. Dans un autre papier, Biocca [42] déclare que cette sensation de présence ne peut se produire que si le participant se sent situé (sens traditionnel d'être là) mais aussi « *actif* » dans l'environnement. Ceci est conforme à la tradition gibsonienne et a également été affirmé par plusieurs chercheurs [43, 44, 45]. D'autres chercheurs en revanche, ont maintenu que la sensation de présence était uniquement lié au « lieu » (dans le sens d'environnement) [46].

Plus tard en 2007, Wirth et al. [12] ont utilisé le terme de « présence spatiale » qu'ils ont défini comme « *l'expérience subjective d'être dans un environnement spatial médiatisé* ». Plus précisément, les auteurs divisent la présence en deux composantes : la sensation d'être physiquement situé dans l'environnement (auto-localisation) et la perception des possibilités d'actions dans cet environnement (actions possibles). Cette définition est également largement inspirée de l'approche de Gibson.

Aujourd'hui encore, les chercheurs continuent de faire référence à la présence comme la sensation d'« être là » dans un espace virtuel ou médiatisé [47, 48, 49], en insistant souvent sur l'importance que l'utilisateur se sente « *concerné* » par l'environnement [50]. Dans cette thèse, la sensation d'être là est également la définition globale de la présence que nous retenons.

1.3.2 L'illusion de non-médiation

En 1993, Slater et Usoh [38] ont introduit la notion que la présence dans un environnement médiatisé était « *la suspension de l'incrédulité* » que l'on est dans un espace autre de celui où se situe notre corps physique. Cette notion met en lumière deux idées nouvelles : premièrement, nous croyons d'abord que nous ne sommes pas dans un environnement médiatisé et deuxièmement, par un processus quelconque, nous pouvons surmonter

3. De part la confusion des différentes définitions de la présence, Slater a renommé plus tard la présence en « *l'illusion d'espace* » (Place Illusion) en gardant toujours la même définition : la sensation d'être là [39])

cette croyance. Ces idées impliquant la suspension de l'incrédulité comme facteur de la présence est un concept récurrent dans la littérature. Nous y reviendrons dans le chapitre 2.

En 1997, Lombard et al. [51] ont proposé de définir la présence comme « *l'illusion perceptive de la non-médiation* ». Cette définition suppose ainsi l'existence d'un système de médiation qui peut « sembler » disparaître. Les auteurs définissent également explicitement la présence comme binaire : « *elle ne se produit pas en degrés mais plutôt se produit ou ne se produit pas à chaque instant de l'expérience* ». Cette binarité est associée à la conceptualisation de la présence comme une illusion : soit l'illusion est en place, soit elle est rompue⁴.

Il est important de noter que les auteurs parlent de la présence qui émerge en environnements distants et virtuels mais pas en environnements réels. On pourrait cependant argumenter que notre expérience du monde est toujours médiatisée (par notre corps), i.e. que notre perception du monde n'est pas la même que le monde lui-même [37, 52]. En d'autres termes, nous n'avons qu'une « illusion » et non une appréhension exacte et complète du monde : la présence en environnements réels est donc seulement un cas particulier de ces expériences de présence en environnements dit « médiatisés ».

En 2000, la Société Internationale pour la Recherche sur la Présence (International Society for Presence Research, ISPR) [53] a défini la (télé)présence comme « *un état psychologique (ou une perception subjective) dans lequel, même si une partie ou la totalité de l'expérience actuelle d'un individu est générée et/ou filtrée par la technologie, une partie ou la totalité de la perception de l'individu ne reconnaît pas précisément le rôle cette technologie dans l'expérience* ». Les auteurs explicitent le fait que le terme présence qu'ils utilisent fait référence à la téléprésence indiquant ainsi que leur définition ne s'applique que dans le contexte d'environnements distants. Quoi qu'il en soit, cette définition met clairement en avant la présence comme une illusion de non-médiation.

Depuis, la définition de la présence comme une illusion de non-médiation a été reprise par divers chercheurs [48, 54, 55].

Lee [56] quant à lui, a proposé une définition de la présence qui s'écarte un peu des deux catégories de définitions proposées ci-dessus. Ainsi, il définit la présence comme « *un état psychologique dans lequel les objets virtuels sont vécus comme des objets réels, de manière sensorielle ou non sensorielle*⁵ ». En d'autres termes, il s'agit d'un état mental dans lequel la virtualité de l'expérience passe « *inaperçue* ». Cette définition met clairement l'accent sur les objets dans l'environnement virtuel : si l'on fait l'expérience de ces objets en tant qu'objets réels, alors on est présent(e) ; sinon, on ne l'est pas. La notion d'être là n'étant plus la qualité première de l'expérience, il est plus facile d'utiliser cette définition dans les applications où l'on interagit par exemple, avec un avatar virtuel plutôt que de faire l'expérience d'un nouveau lieu.

4. Le renommage de Slater [39] de la présence en illusion de l'espace soutient cette approche.

5. Le terme « non sensoriel » permet de rendre compte des situations où la sensation de présence est suscitée par des médias non-immersifs.

En parallèle à ces efforts pour définir la sensation de présence, le concept a évolué pour inclure de nouveaux états psychologiques - plus au moins proches de son sens originel d'« être là » - tels que « *être avec* » [32] ou « *être ensemble* » [57]. Cette évolution a entraîné une confusion terminologique et théorique autour du concept et a rendu « caduc » une définition unifiée de la présence. Par conséquent, différentes « formes » de présence ont vu le jour, ce qui a permis d'expliquer plus clairement chaque état psychologique. Nous donnons à ces formes l'appellation de « dimensions » d'une présence devenue multidimensionnelle ou « globale » (i.e. englobant tous les états).

Note : Dans un souci de parcimonie, le terme « présence globale » sera résumé au terme « présence » dans la suite de cette thèse.

1.4 Dimensions de la présence

Une grande variété de dimensions de la présence ont été proposées par des chercheurs dans différents domaines. Par exemple, Reiner et Hecht [58] ont défini la « présence d'objet » (object presence) comme la sensation de pouvoir toucher et manipuler des objets virtuels dans des environnements virtuels haptiques. On peut également citer la « présence environnementale » [14], la « présence connectée » [59] et la « présence temporelle » [60].

Néanmoins, nous avons choisi de nous concentrer sur les trois dimensions que sont la « **présence de soi** », la « **présence sociale** » et la « **présence spatiale** », ainsi que sur la relation qui existent entre elles, en raison de leur pertinence dans le domaine de la robotique et de la RV [49].

1.4.1 Présence de soi

Plusieurs chercheurs ont estimé que la définition de la présence en tant que sensation d'être là n'était pas suffisante pour expliquer l'ensemble du processus qui se mettait en place au moment de l'expérience de la présence par un utilisateur [49, 61]. Selon cette idée, pour qu'un utilisateur se sente réellement présent dans un environnement et « le vive comme une réalité », il doit également avoir « *la sensation que son corps fasse parti de cet environnement* » [14]. En d'autres termes, l'utilisateur doit être conscient de son identité lorsqu'il est transporté dans un environnement, qu'il soit réel ou non. Cette sensation est généralement appelée dans la littérature la « présence de soi » [32, 14].

En outre, Lee [56] en donne une bonne définition : « *la présence de soi est l'expérience de la représentation de soi - soit physiquement manifestée, soit psychologiquement supposée - ou d'un alter-égo construit à l'intérieur d'un environnement* ». Par sa définition, il souligne l'importance pour un utilisateur de construire une représentation mentale de lui-même dans l'environnement afin de faire l'expérience de la présence. Cette représentation peut être simplement supposée par l'utilisateur, ce qui signifie qu'il n'est pas obligatoire de le représenter physiquement (au moyen de la technologie). Néanmoins, Lee affirme que la sensation de présence de soi est renforcée par

l'expérience d'une représentation physique partielle ou totale de soi-même.

On parvient à cette représentation de l'utilisateur principalement en utilisant des avatars. Des chercheurs comme Eastwick et Garnder [62] et Gee [63] ont ainsi démontré - dans le contexte des jeux virtuels - que les utilisateurs qui « habitent » leur avatar (i.e. qui ne ressentent aucune distinction entre eux et leur avatar) ont une présence de soi plus élevée. De même, Jin [1] a trouvé que la sensation de présence de l'utilisateur est renforcée par un avatar qui représente son soi réel (figure 1.3).

De nombreux chercheurs ont également étudié l'effet des avatars sur la construction d'un modèle mental virtuel de notre corps mais aussi sur l'incarnation de soi (embodiment). Des travaux plus approfondis sur ce sujet sont disponibles dans [64, 65].

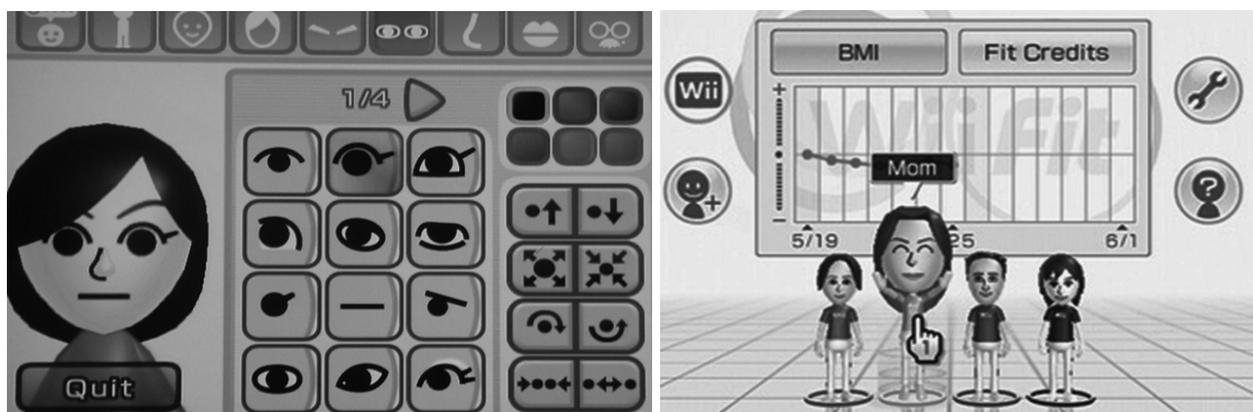


FIGURE 1.3 – Interface expérimentale utilisée par les participants pour customiser leur avatar : Mii Channel (à gauche) et Wii fit (à droite) [1].

1.4.2 Présence sociale

L'étude de la présence sociale dans le domaine de l'informatique tire ses bases de « la théorie de la présence sociale » de Short. Dans sa théorie [66, 67], Short définit la présence sociale comme « *le degré d'importance de l'autre personne dans une interaction* ». Cette définition a été adaptée au contexte des environnements distants et virtuels où la présence sociale a été définie comme l'« *état psychologique qui reflète l'expérience subjective d'être avec d'autres personnes dans une communication médiatisée* » [57, 32, 51].

Établir une présence sociale a permis de mettre en évidence que la présence n'incluait pas nécessairement la sensation d'« être transporté » dans un environnement [56]. Par exemple, un utilisateur en téléconférence peut ressentir la présence de ses interlocuteurs sans pour autant avoir la sensation de se déplacer dans l'espace physique (ou virtuel) de chacun de ces derniers. Dans cette idée, Schultze [49] fait référence à la présence sociale comme étant le sens d'« être avec » par opposition au sens d'« être là » lié au sens originel de la présence. Il définit sur cette base la présence sociale comme « *la sensation d'accès à un autre éloigné* », en contraste avec « *la sensation d'accès à un lieu éloigné* » qu'il utilise pour désigner la présence spatiale.

La définition de la présence sociale a ensuite été affinée pour englober le fait que la perception d'autres êtres pouvait être simulée par d'autres entités « humaines ou non humaines » [56, 68, 69]. Aussi, comme pour la présence de soi, la présence sociale peut être vécue avec d'autres entités physiquement représentées ou psychologiquement supposées. En outre, l'influence de l'incarnation sociale (social embodiment), notamment par l'utilisation d'avatars, a été largement étudiée. Taylor [70] a par exemple constaté que les avatars rendaient les utilisateurs plus présents à la fois pour eux-mêmes (présence de soi) et pour les autres (présence sociale). Ces résultats ont été validés par différentes études [71, 72, 73].

Pour finir, la présence sociale reste un sujet d'actualité dans l'étude de divers aspects culturels de notre société tels que la confiance, la loyauté ou l'intention d'achat [74, 75]. Ces études sont notamment importantes pour améliorer la qualité des applications de RV dans le contexte des réseaux sociaux. On peut citer à titre d'exemple Facebook et sa plateforme « Horizon »⁶ censée représenter un lieu virtuel où les joueurs - incarnés par des avatars entièrement personnalisables à l'esthétique cartoon - pourront se rencontrer, échanger et créer des univers dans des « mondes » divers. Le lancement de la plateforme est en cours au moment même de la rédaction de cette thèse (voir figure 1.4).



FIGURE 1.4 – Plateforme « Horizon » développée par Facebook (images extraites de la vidéo de lancement).

6. <https://www.oculus.com/facebook-horizon/>

1.4.3 Présence spatiale

Souvent définie comme la sensation d'« être là », la présence spatiale est de loin la dimension la plus proche de la notion initiale de la présence [15]. Elle est d'ailleurs considérée par certains chercheurs comme l'équivalent de la téléprésence. Néanmoins, la présence spatiale englobe une définition plus générale car elle est indépendante des technologies de médiation, contrairement à la téléprésence qui a toujours été liée à la technologie (transmission de données sensorielles et motrices) [12].

La caractéristique essentielle de la présence spatiale est la conviction d'être physiquement situé quelque part [12]. Cette caractéristique a une importance particulière pour les chercheurs en robotique désireux d'améliorer les performances des téléopérateurs lors de tâches de manipulation à distance. De nombreuses études ont ainsi souligné la valeur de la présence spatiale dans la transmission d'informations, notamment en ce qui concerne la perception spatiale des sites distants [76, 15].

En parallèle, des études ont souligné l'importance de fournir aux téléopérateurs des repères spatiaux pour améliorer leur sensation de téléprésence. C'est dans ce contexte que Muhlbach et al. [77] ont introduit le terme de « présence spatiale » en environnements distants. Plus précisément, ils ont supposé que la téléprésence était affectée par deux variables : (1) **la présence communicative**, définie comme le degré de transmission des signaux réciproques (verbaux et non verbaux) et (2) **la présence spatiale**, définie comme le degré de transmission des indices spatiaux concernant le site distant. Les auteurs ont alors mené une expérience pour étudier comment les indices spatiaux (auditifs et visuels) affectaient l'impression de présence spatiale et de téléprésence dans un système de vidéo-conférence. Les données recueillies à l'aide d'un questionnaire ont indiqué que les indices spatiaux amélioraient la présence spatiale ainsi que la téléprésence.

De même, dans le contexte de la RV, de nombreuses expériences basées sur la localisation ont identifié des éléments spatiaux qui contribuent à améliorer la sensation de présence de l'utilisateur, tels que l'affichage sur un grand champ de vision, le suivi de la tête, la stéréoscopie, les points de repère sonores en 3D et l'interaction spatiale [78]. Biocca [32] a alors introduit le terme « présence physique » défini comme « *la sensation d'être physiquement transporté dans des environnements virtuels ou médiatisés* ». Cette définition a rapidement été adoptée dans la communauté comme faisant référence à la présence spatiale en environnements virtuels.

Dès lors, les chercheurs en RV visant à améliorer l'efficacité de leurs applications ont étudié cette sensation de manière intensive. Ainsi, il a été démontré que la présence spatiale pouvait faciliter le transfert des informations nécessaires à la bonne conduite des opérations chirurgicales à distance [79], ou améliorer la capacité d'apprentissage lors de l'enseignement en environnement virtuel [80]. Elle peut également intensifier les effets positifs des applications et leur impact sur les réactions émotionnelles des utilisateurs, tels que le plaisir et la satisfaction dans les jeux virtuels [81] et la peur et l'anxiété lors de thérapies virtuelles [82].



FIGURE 1.5 – Exemples de cas d'utilisation de la présence spatiale. Image du haut : interface immersive de contrôle à distance SACARI [2]. Image du milieu : cours sur la biologie moléculaire donné en RV par le professeur Eichacker lors de la conférence EdTech en 2017. Image du bas : application de RV pour la thérapie contre l'arachnophobie (image extraite de ce lien).

Finalement, la présence spatiale est aujourd'hui utilisée pour faire référence à la sensation d'être là aussi bien dans les environnements distants que virtuels et même réels [12, 83] (nous revenons plus en détails sur les différences entre ces environnements dans la section 1.6). En nous basant sur la définition de Sheridan [15] et Wirth et al. [12], nous définissons la présence spatiale dans cette thèse comme suit :

La présence spatiale est la sensation d'être situé(e) dans un environnement qu'il soit réel, médiatisé au moyen de technologie (distant) ou synthétisé par ordinateur (virtuel).

1.4.4 Entre la présence spatiale et sociale : la co-présence

En plus de définir les différentes dimensions de la présence, il est important pour une parfaite compréhension du concept de déterminer également les relations entre ces dimensions. C'est ce qu'a fait Ijsselstein et al. [84] en étudiant l'intersection de la présence spatiale et de la présence sociale. Selon les auteurs, cette intersection conduit à une nouvelle dimension qu'ils ont nommée « **co-présence** » et défini comme la sensation d'« *être ensemble* » par opposition à la sensation initiale d'« être là » de la présence spatiale et la sensation d'« être avec » de la présence sociale.

La définition a été affinée par la suite pour indiquer « *la sensation que d'autres utilisateurs dans un environnement existent réellement et sont présents dans le même environnement* » [84, 85].

En clair, pour qu'un utilisateur soit co-présent, il doit éprouver en même temps (voir figure 1.6) :

- La sensation d'être « transporté » dans un espace réel, distant ou virtuel (présence spatiale).
- Et la sensation de « communion avec d'autres utilisateurs » (présence sociale).

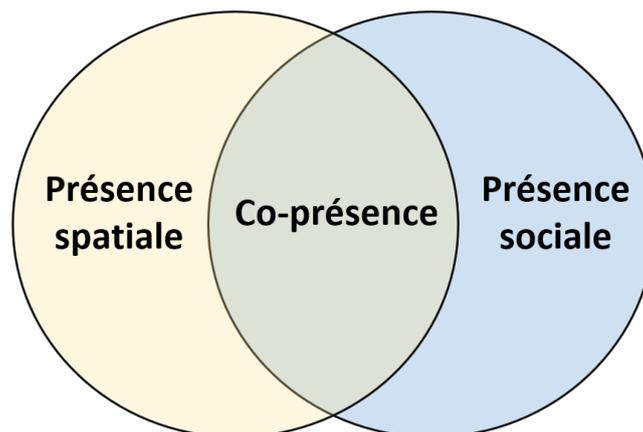


FIGURE 1.6 – Illustration graphique de la relation entre la présence spatiale, la présence sociale et la co-présence.

Afin de pouvoir étudier le processus de formation des différentes dimensions de la présence, les chercheurs se basent sur un ensemble de méthodes qui permettent de mesurer le degré de sensation de présence de participants exposés à différents environnements. Nous présentons maintenant ces méthodes d'évaluation.

1.5 Méthodes d'évaluation de la présence

De nombreuses méthodes d'évaluation de la présence ont été rapportées dans la littérature. Ces méthodes peuvent être divisées en méthodes subjectives et objectives. Les méthodes subjectives sont basées sur l'auto-évaluation (principalement à l'aide de questionnaires post-expérimentaux). Quant aux méthodes objectives, elles incluent des mesures basées sur la performance des utilisateurs dans la réalisation d'une tâche donnée, sur l'analyse de leur comportement ainsi que leurs réponses physiologiques. Cette classification des méthodes de mesures de la présence a été inspirée des travaux de Welch et al. [86]. Or, une nouvelle classe, les « mesures psychocognitives » a été proposée par Skarbez et al. [36]. Bien qu'elles se distinguent des autres mesures abordées dans cette section - dans la mesure où elles ne sont utilisées que depuis très peu de temps pour mesurer la présence - nous avons choisi de les ajouter à notre classification car elles offrent une méthodologie nouvelle d'évaluation de la présence. A noter que si toutes ces méthodes ont surtout été développées dans le contexte des environnements virtuels, elles peuvent néanmoins être tout autant utilisées dans l'étude de la présence en environnements distants.

1.5.1 Méthodes d'auto-évaluation

L'auto-évaluation fait référence à toutes les techniques par lesquelles les utilisateurs font part de leurs ressentis, perceptions ou comportements, pendant ou après une expérience.

De nombreux chercheurs ont proposé des techniques d'auto-évaluation comme moyen **simple et non intrusif** d'évaluer la présence. Par exemple, en interrogeant les participants après qu'ils aient fait l'expérience d'un environnement [87, 88] ou en les confrontant à un enregistrement vidéo de leur propre activité ou celles d'autres participants [89, 90, 91].

Outre les entretiens et les confrontations, d'autres techniques d'auto-évaluation plus originales ont été introduites pour permettre aux participants d'évaluer leur sensation de présence. Snow et Williges [92] ont par exemple proposé une technique d'« estimation de la magnitude » qui consiste à : (1) présenter une série de stimuli sensoriels à des participants, (2) les inviter à attribuer au premier stimulus un nombre positif représentant le niveau de présence que ce stimulus engendre et (3) leur demander de noter les stimuli suivants par rapport à ce premier nombre.

Freeman et al. [93] ont évalué la présence en utilisant un curseur manuel qui était continuellement échantillonné par les participants pendant l'expérience. Ces derniers avaient au préalable reçu l'instruction de déplacer le curseur en fonction de la présence qu'ils ressentaient. Cette technique a été utilisée dans plusieurs études, elle a cependant été fortement critiquée pour son influence dans la formation de la présence lors de l'expérience en forçant les participants à y penser. Dans la même optique, Slater et Steed [94] ont proposé un « compteur de présence » mesurant le nombre de fois, au cours d'une expérience, où les participants passaient de la sensation d'être dans l'environnement virtuel à la sensation d'être dans le monde réel. Ils ont nommé ces transitions, des « *interruptions* » (breaks) de présence. Les résultats de leur étude ont indiqué que les interruptions de présence étaient associées à

la sensation de présence spatiale reportées après l'exposition à un environnement virtuel. De même, Brogni et al. [95] ont montré que la sensation globale de présence de l'utilisateur dans un environnement virtuel était corrélée négativement avec le nombre d'interruptions de présence signalées pendant l'exposition.

Pour finir, Kuschel et al. [96] ont étudié l'effet que pouvaient avoir des informations sensori-motrices contradictoires sur l'émergence de la présence. Lors d'une expérience, ils ont présenté à des participants plusieurs flux de données sensorielles conflictuelles provenant de canaux différents. Après l'expérience, les participants devaient signaler l'information sensorielle qu'ils avaient perçue comme « dominante ». Ils étaient alors considérés présents dans l'environnement associé à cette information.

Post-questionnaires

Faciles à administrer et à évaluer, les questionnaires de présence ont largement été utilisés depuis les premiers jours de la recherche sur la présence. Rosakranse et Oh [97] ont notamment identifié cinq questionnaires de présence canoniques entre 1998 et 2012, à savoir - le questionnaire SUS (Slater, Usoh et Steed) [98, 99, 100], le questionnaire WS (Witmer et Singer) [40], l'IPQ (I groupe Presence Questionnaire) [101], l'ITC-SOPI (ITC-Sense of Presence Inventory) [34] et le TPI (Temple Presence Inventory) [102].

En rassemblant différents items sous plusieurs échelles, ces questionnaires fournissent des scores qui mettent en évidence différents facteurs jouant un rôle dans l'émergence de la présence tels que le niveau d'immersion de la technologie, l'affordance de l'environnement, la satisfaction de l'utilisateur et le niveau de réalité de l'expérience pour n'en citer que quelques-uns. Nous reviendrons plus en détails sur les facteurs de la présence dans le chapitre suivant. Les questionnaires de présence qui existent dans la littérature seront quant à eux, listés de manière détaillée dans le chapitre 3.

Bien qu'ils aient démontré leur utilité pour mesurer la sensation de présence, les questionnaires n'offrent pas de mesure continue pendant l'expérience car les participants les remplissent généralement à la fin de leur expérience (afin de ne pas provoquer de ruptures qui réduisent la présence). De plus, et cela s'applique à l'ensemble des mesures subjectives, les questionnaires sont fortement dépendants des expériences antérieures des participants et s'appuient sur l'interprétation de concepts potentiellement complexes pour générer des résultats significatifs.

En parallèle des questionnaires, des méthodes objectives fournissant une mesure plus continue de la présence ont été développées pour être utilisées en combinaison avec les mesures subjectives d'auto-évaluation. En particulier, les mesures de performance peuvent fournir un indicateur objectif de la présence. Cependant, leur usage nécessite certaines précautions comme nous allons le voir ci-dessous.

1.5.2 Mesures de performance

Les corrélations possibles entre présence et performance ont suscité un vif intérêt chez les chercheurs dès les premiers travaux sur le sujet, que ce soit dans le cadre des systèmes de téléopération ou des environnements virtuels.

Différents types de tâches peuvent être mises à profit pour évaluer les performances. Selon le type choisi, la relation entre la présence et la performance peut être fortement affectée et mener à des résultats différents [103]. Les catégories de tâches les plus courantes sont les tâches de mémoire, d'apprentissage et celles de manipulation [104].

Dans le cadre des tâches de mémoire, Kim et Biocca [41] ont rapporté lors d'une expérience où des participants regardaient la télévision, une faible corrélation entre un facteur de présence qu'ils ont nommé « départ » (défini comme la sensation de ne pas être présent dans le monde réel) et la performance des participants mesurée par leur niveau de mémorisation de publicités diffusées lors du visionnage. Sutcliffe et al. [105] ont également étudié la relation entre les capacités de mémorisation de 15 participants et leur sensation de présence dans trois environnements différents : une CAVE, un workbench interactif et une pièce réelle (le scénario dans l'environnement représentait une tâche de maintenance). Les participants devaient - après avoir été exposés à chaque environnement - se rappeler de l'emplacement de 10 objets situés dans ces derniers. Les résultats de l'étude ont montré que la CAVE - plus immersive que le workbench - offrait une meilleure sensation de présence (mesurée à l'aide du questionnaire WS [40]) et que les participants se souvenaient mieux des objets dans cette condition.

Concernant les tâches d'apprentissage, Youngblut et Huie [106] ont constaté une corrélation significative entre la présence (mesurée par le questionnaire SUS [107]) et la performance de 35 participants dont la tâche consistait à apprendre une procédure relative à une mission lors d'un entraînement en environnement virtuel. A contrario, l'étude de Mania et Chalmers [108] n'a montré aucune corrélation entre la présence et la capacité d'acquérir des connaissances pendant un cours. A noter que bien que ces deux études portent sur des tâches d'apprentissage, acquérir des connaissances pendant un cours relève beaucoup plus de l'abstrait, ce qui peut expliquer cette opposition dans les résultats.

Pour mieux comprendre la relation entre la présence et la performance dans ce type de tâches, Jerome et Witmer [109] ont élaboré un modèle dont deux composantes étaient la présence et la performance. Les données ont été recueillies auprès de 203 étudiants dans le cadre de 5 études distinctes utilisant divers environnements virtuels et tâches d'apprentissage. Deux études [110, 111] consistaient à former des personnes à naviguer dans un modèle virtuel représentant un bâtiment complexe et à évaluer dans quelle mesure les personnes pouvaient ensuite naviguer dans le bâtiment réel, en utilisant le Fakespace Lab BOOM 2C pour afficher et contrôler les déplacements des participants dans l'environnement. La troisième étude [112] consistait à acquérir des connaissances en matière d'enquête. Les participants devaient apprendre la disposition d'un étage dans un bâtiment virtuel en utilisant

trois aides à la navigation différentes : vue aérienne vs. perspective normale, présence ou absence de repères d'orientation, et environnement virtuel amélioré (avec sons) vs. standard. L'environnement était affiché à l'aide du visiocasque Virtual Research (VR) 8. La quatrième étude [113] portait sur une tâche de recherche dans des bureaux virtuels affichés sur un VR4. Finalement, la dernière étude [114] portait sur l'entraînement d'une équipe dans un environnement virtuel affiché sur un VR8.

Dans chacune de ces études, le questionnaire WS [40] a été administré après l'achèvement des tâches. Les résultats de la modélisation par équation structurelle ont indiqué que la sensation de présence en environnements virtuels avait une relation de cause à effet directe sur la performance des tâches d'apprentissage.

La relation de la présence avec la performance dans les tâches de manipulation a aussi beaucoup été étudiée. Par exemple, Stanney et al. [115] ont mené une étude dans laquelle des participants situés dans un environnement virtuel devaient accomplir le maximum de tâches de manipulation - relativement simples - possible. Les résultats ont montré que de meilleures performances, mesurées par le nombre de tâches accomplies et le temps nécessaire pour accomplir ces tâches, se traduisaient par une sensation de présence plus élevée. Plus récemment, Stevens et Kincaid [116] ont étudié la relation entre la présence et la performance dans le cadre d'une formation basée sur une simulation virtuelle. Ils ont ainsi mené une expérience dans laquelle des participants étaient placés dans un système de simulation d'entraînement virtuel et devaient détruire autant de forces ennemies (virtuelles) que possible. Les résultats ont montré une relation modérée entre le degré de présence (mesuré avec le questionnaire WS [40]) et la performance des participants, quel que soit leur niveau d'expertise et l'affichage visuel utilisé (visiocasque ou écran plat). Cooper et al. [3] ont mené une étude dans laquelle les participants devaient changer une roue dans un environnement virtuel immersif restitué sur un écran d'affichage stéréoscopique (figure 1.7). Les résultats ont indiqué une relation modérée entre le temps d'achèvement de la tâche et la présence reportée (mesurée à l'aide d'un questionnaire adapté du WS).

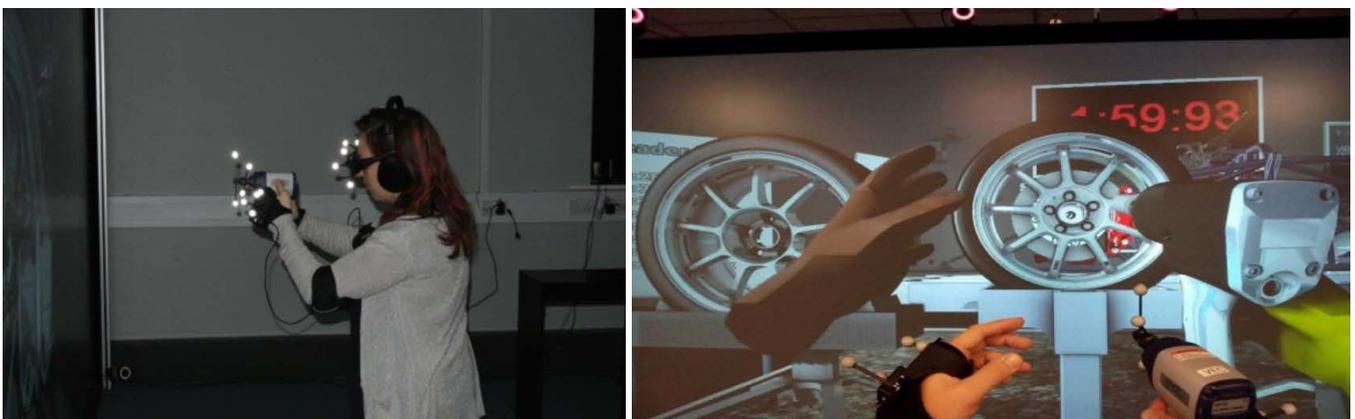


FIGURE 1.7 – Image de gauche : un participant portant l'équipement constitué de lunettes stéréoscopiques, d'écouteurs et de gants vibro-tactiles et tenant un outil pour effectuer la tâche. Image de droite : point de vue du participant durant l'expérience : ses mains et l'outil sont co-localisés avec leurs homologues virtuels [3].

D'un autre côté, certains chercheurs affirment que la présence n'est pas impactée par la performance des utilisateurs lors d'une tâche [117]. Knerr et al. [118] ont notamment examiné les résultats de 12 expériences et n'ont relevé que trois cas de corrélation positive entre la présence (mesurée à l'aide de leur questionnaire) et la performance des participants. Welch [86] a mené une expérience dans laquelle les participants devaient contrôler une voiture virtuelle et tenter d'entrer en collision avec des cubes dans un délai déterminé. L'environnement virtuel était affiché dans un visiocasque. Les résultats n'ont montré aucune corrélation entre la sensation de présence des participants, évaluée sur une échelle de 1 à 100 %, et la performance mesurée par le nombre de collisions.

Ainsi, les mesures de performance peuvent fournir des indicateurs objectifs de la présence spatiale [119, 120]. Or, comme pour toute mesure mais cela est encore plus important dans le cas de l'analyse des performances, **il faut que les environnements comparés entre eux présentent le même niveau de fidélité** [121]. McMahan et al. ont notamment constaté que la manipulation d'objets peut être effectuée avec succès avec des technologies de RV de moindre fidélité (sous entendu engendrant moins de présence), tels que des écrans moins coûteux, sans perte d'efficacité. En outre, cette similarité est surtout importante concernant les techniques utilisées pour interagir dans les environnements : la manière dont les utilisateurs interagissent pouvant influencer leurs performances et leur présence [122].

De plus, en fonction de la tâche, certains paradigmes d'interaction peuvent être plus ou moins efficaces et avoir un impact important sur les performances des utilisateurs sans affecter leur sensation de la présence. Ainsi, quand certaines techniques font un meilleur usage des compétences innées des utilisateurs (ex. les interactions basées sur des gestes naturels) plutôt que d'imposer de nouveaux processus d'apprentissage, d'autres techniques s'appuient sur les compétences acquises et les expériences antérieures des utilisateurs (ex. les interactions au moyen d'un joystick) pour améliorer les performances et cela, sans affecter la présence ressentie [123, 122].

Néanmoins, les mesures de performance restent prometteuses. En particulier, avec les avancées technologiques en matière de fidélité sensorielle et motrice des interfaces utilisateur, les différences entre le monde réel et les environnements distants et virtuels s'amenuisent. C'est pour cela que, durant cette thèse, nous avons tenu à explorer davantage la relation entre la présence et la performance dans des environnements immersifs différents.

1.5.3 Mesures comportementales

Les mesures comportementales ont l'avantage d'être objectives par rapport aux mesures d'auto-évaluation et non intrusives par rapport aux mesures physiologiques (voir section 1.5.4). Pour ces raisons, de nombreux chercheurs ont étudié la relation entre les indicateurs comportementaux et la sensation de présence [69, 124, 56]. L'hypothèse couramment avancée est que « **se sentir présent dans un environnement donné contribue à rapprocher le comportement des utilisateurs de celui qu'ils ont dans le monde réel** » [125, 123]. Schuemie et al. [83] ont ainsi souligné comment les expériences virtuelles ou à distance pouvaient susciter les mêmes réactions que les expériences réelles, du moins tant qu'un certain degré de similitude (fidélité sensori-motrice) existait dans

les différents environnements.

Ces réactions peuvent prendre la forme de réflexes à des stimulus menaçants (i.e. danger virtuel) [39]. Par exemple, Usoh et al [99] se sont intéressés lors d'une expérience à la situation dans laquelle des participants étaient prêts à passer au-dessus d'une fosse virtuelle pour se diriger vers une chaise située de l'autre côté. Pour ce faire, ils ont analysé le chemin que les participants empruntaient pour accomplir la tâche. Les résultats ont montré une corrélation positive entre la mesure comportementale extraite de la trajectoire des participants et la présence subjective mesurée par un questionnaire. Dans le même registre, Regenbrecht et al. [126] ont démontré que l'anxiété (mesurée à l'aide du questionnaire State-Trait Anxiety Index [127]) augmentait avec une présence plus importante dans un environnement virtuel conçu pour susciter l'acrophobie (peur des hauteurs). Un peu plus récemment, Maïano et al. [4] ont trouvé une corrélation entre des stimuli aversifs (feu, écran de fumée et alarme) représentés dans un environnement virtuel, le degré d'anxiété auto-évalué des participants naviguant dans cet environnement et la façon dont ils s'éloignaient du « danger » (figure 1.8).

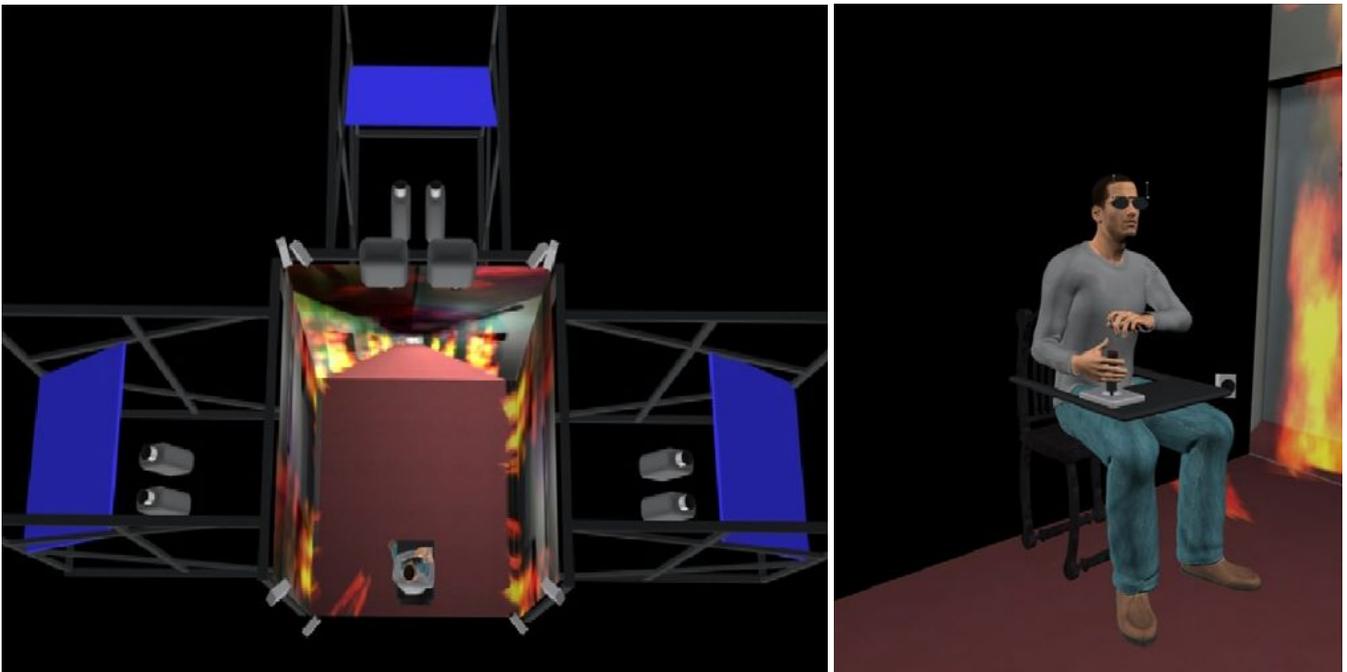


FIGURE 1.8 – Représentation schématique de l'expérience de Maïano et al. [4]. Image de gauche : environnement virtuel immersif est généré dans une CAVE. Image de droite : un participant assis à l'intérieur de la CAVE, portant des lunettes avec filtres stéréo en train de contrôler ses déplacements dans l'environnement à l'aide d'un joystick.

Les réactions évoquées par l'environnement peuvent également prendre la forme d'ajustements posturaux et de mouvements du corps en réponse au contexte de l'environnement. Par exemple, Freeman et al. [128] ont mesuré l'ampleur des mouvements latéraux de participants assis en train de regarder une séquence vidéo filmée depuis le capot d'une voiture parcourant une piste de rallye. Les résultats n'ont montré aucune relation significative entre la sensation de présence des participants et leurs changements posturaux au cours de l'expérience. Cependant, le degré de présence n'était déterminé que par une seule question. Les auteurs ont donc conclu que de telles

réponses posturales pouvaient être utiles pour corroborer les évaluations subjectives de la présence mais pas pour les remplacer. De même, Lepecq et al. [5] ont examiné, dans une CAVE, l'ajustement postural (mouvement du corps) de participants lorsqu'ils marchaient entre deux murs réels ou virtuels, plus au moins éloignés l'un de l'autre (figure 1.9). Les résultats ont indiqué le fait que les participants faisaient pivoter leur corps de la même manière dans les deux situations réelle et virtuelle. En outre, la rotation du corps se faisait en fonction de l'espace entre les murs et de la largeur des épaules du participant.



FIGURE 1.9 – Représentation d'un participant marchant entre deux murs virtuels [5].

Les changements posturaux peuvent également être induits par des comportements socialement conditionnés [15]. Bailenson et al. [129] ont notamment proposé, comme mesure de la présence sociale, la distance maintenue entre des utilisateurs et des agents virtuels situés dans les mêmes environnements virtuels. Dans cet optique, ils ont mené deux expériences :

1. Dans la première, les participants étaient debout pendant qu'un agent virtuel s'approchait d'eux.
2. Dans la seconde, l'agent virtuel était immobile tandis que les participants s'approchaient de lui.

Lors de ces deux expériences, les chercheurs se sont intéressés aux changements de posture des participants et à la distance qu'ils maintenaient entre eux et l'agent, lorsque ce dernier envahissait leur espace personnel (dans la première expérience), ou lorsque les participants s'en approchaient (dans la seconde expérience). Les résultats de l'analyse de la distance interpersonnelle ont montré que les participants présentaient des schémas de comportement par rapport aux agents virtuels similaires à ceux observés avec des humains réels.

D'autres indicateurs comportementaux ont également été mentionnés comme mesures potentielles de la présence notamment les mesures basées sur l'attention de l'utilisateur. Par exemple, Prothero et al. [130] ont étudié les réponses de participants à des indices virtuels lorsqu'ils étaient confrontés à des indices réels contradictoires. Plus récemment, Bracken et al. [131, 132] ont examiné la relation entre la présence ressentie par des participants (mesurée par le TPI [102]) et leur temps de réaction à des distractions auditives lors du visionnage d'un film. Une

corrélation significative a été trouvée entre ce temps de réaction et deux facteurs de la présence : l'immersion et l'attention.

En résumé, les résultats autour des mesures comportementales sont très prometteurs. Cependant, des recherches sont encore nécessaires pour **établir une relation fiable entre la sensation de présence et le grand nombre d'indicateurs qui peuvent être extraits du comportement des utilisateurs**. Durant cette thèse, plusieurs indicateurs comportementaux inspirés des mesures existantes ont été utilisés lors de nos expérimentations. Leurs relations avec la présence spatiale ainsi que certains de ses facteurs ont été analysées en se basant sur l'approche consistant à comparer les résultats de mesures objectives avec les réponses aux questionnaires de présence [132, 128].

1.5.4 Mesures physiologiques

Plusieurs études ont été menées dans le but d'évaluer la fiabilité des indicateurs physiologiques pour mesurer la présence. Par exemple, Dillon et al. [133, 134] ont étudié la relation entre la conductance de la peau (également appelée réponse galvanique de la peau ou activité électrodermique) et les données de l'électrocardiogramme avec la sensation de présence (mesurée par l'ITC-SOPI [34]). Ils ont mené une expérience dans laquelle des participants regardaient une vidéo présentée avec ou sans perception stéréoscopique. Les résultats n'ont cependant montré aucune corrélation significative entre les mesures physiologiques enregistrées et la présence reportée.

A contrario, Meehan et al. [6, 135] ont montré, lors de deux expériences, que dans un environnement virtuel immersif stressant (falaise visuelle dans la première expérience et salle remplie de mines dans la deuxième), les changements de fréquence cardiaque étaient en corrélation positive avec la présence telle que mesurée par le questionnaire SUS [107] (la figure 1.10 illustre l'équipement porté par les participants durant la première étude). Suivant cette approche, Slater et al. [136, 137] ont utilisé la fréquence cardiaque, la variabilité de la fréquence cardiaque et l'activité électrique du cerveau pour mesurer les réponses de participants lors d'interruptions de présence en environnements virtuels.

Baumgartner et al. [138] quant à eux, ont étudié les corrélats neuronaux de la présence en environnements virtuels en utilisant l'« imagerie par résonance magnétique fonctionnelle » (IRMf). Plus précisément, les auteurs ont manipulé plusieurs facteurs associés au réalisme de l'environnement. La comparaison des données leur a permis d'identifier le cortex préfrontal dorsolatéral comme région cérébrale potentiellement en corrélation avec l'émergence de la sensation de présence. Bouchard et al. [139, 140] ont également utilisé l'IRMf pour évaluer la présence et ont notamment mis en évidence la zone de la parahippocampe. D'autres études basées sur l'IRMf ont depuis été menées [141]. A noter que ces études sont plutôt issues d'une approche neurobiologique et pourraient donc être répertoriées dans une classe adjacente aux mesures physiologiques.

Plus récemment, Bouchard et al. [142] ont exploré l'impact du réalisme « subjectif » qu'ils ont défini comme « /e



FIGURE 1.10 – Un participant portant un visiocasque et un équipement mesurant la fréquence cardiaque [6].

fait de considérer l'environnement comme réel » sur la sensation de présence. Ils ont mené une étude où des participants situés dans un environnement virtuel étaient amenés à croire que l'environnement était réel (i.e. qui existait dans le monde réel). Les résultats ont montré que les participants les plus enclins à croire que l'environnement était réel ressentaient un degré de présence considérablement plus élevé. Nous reviendrons sur l'influence de la réalité de l'environnement plus en détail dans le chapitre 2.

Tous ces résultats montrent que les indicateurs physiologiques pourraient devenir des mesures de la présence fiables. Néanmoins, leur corrélation avec la présence telle que définie plus haut n'est pas encore fermement établie [143]. Une approche commune pour atteindre cet objectif consisterait à comparer les résultats de ce type de mesures avec les résultats des questionnaires sur la présence [132, 128].

De plus, il a été démontré que les équipements nécessaires à l'enregistrement des réponses physiologiques, tels que l'électroencéphalographie (EEG) pour mesurer l'activité du cerveau, peuvent être en soi une cause de rupture de la présence pendant l'expérience [95]. Aussi, ces équipements sont plus efficaces lorsque les participants ne bougent pas [144], ce qui réduit considérablement la portée des expériences possibles. Plus important encore, ces mesures nécessitent une comparaison de base (référentiel) pour chaque participant avant l'expérience, ce qui implique un effort considérable dans la conception de l'étude et une fatigue supplémentaire pour les participants.

1.5.5 Mesures psycho-cognitives

Slater et al. [7] sont les premiers à avoir proposé une méthode basée sur une approche psycho-cognitive pour évaluer l'influence de différents facteurs sur la sensation de présence. Dans leur étude, ils ont exposé des participants à un environnement virtuel dont la configuration présentait un degré d'immersion et de cohérence (définie comme l'« *ensemble des circonstances raisonnables qui peuvent se produire dans l'environnement sans introduire de circonstances déraisonnables* » [145]) maximal. Les participants avaient alors comme instruction de se souvenir du niveau de présence qu'ils ressentaient dans cet environnement. Ils étaient ensuite exposés à plusieurs « versions réduites » de l'environnement et il leur était alors demandé de faire correspondre chaque configuration de l'environnement à la présence ressentie en améliorant l'immersion ou la cohérence (en choisissant des transitions entre des configurations de qualité inférieure et supérieure) dans l'ordre qu'ils jugeaient approprié. La figure 1.11 illustre un environnement dans deux configurations de cohérence et d'immersion différentes.

Ce faisant, les auteurs ont pu générer un ordre des facteurs classés selon l'importance de chacun dans l'émergence de la présence auprès des participants. Ils ont notamment constaté que la cohérence des canaux sensorimoteurs mais aussi la fidélité de représentation de l'avatar étaient des facteurs plus importants pour la présence que ne l'est le réalisme visuel de l'environnement.



FIGURE 1.11 – Vue d'ensemble de l'environnement virtuel. Image de gauche : configuration avec un degré d'immersion et de cohérence maximal : rendu avec illumination, ombres dynamiques et réflexion en temps réel. Image de droite : configuration de « mauvaise qualité » : ombrages simplifiés (Gouraud) et absence d'illumination et de réflexion [7].

Des méthodes similaires ont été employées notamment par Azevedo et al. [146, 147] pour étudier les effets de la multisensorialité (visuelle, auditive, haptique et olfactif) sur la sensation de présence. Pareillement, Bergström et al. [8] ont étudié le rôle des caractéristiques auditives d'un environnement virtuel sur le niveau de plausibilité (définie comme l'illusion que les événements perçus dans l'environnement se produisent réellement [39]) perçue par les participants. L'environnement représentait une performance de quatuor à cordes virtuel (voir figure 1.12),

dont quatre caractéristiques ont été étudiées :

- Le regard des musiciens virtuels : soit ils ignoraient le participant, soit ils le regardaient et suivaient parfois ses mouvements.
- La spatialisation du son : mono, stéréo ou spatial.
- L'auralisation : pas de réflexions sonores, réflexions correspondantes à une pièce plus grande que celle perçue ou réflexions qui correspondaient exactement à la taille de la pièce virtuelle.
- L'environnement : pas de son provenant de l'extérieur de la pièce ou chants d'oiseaux et bruit de vent correspondant à la scène extérieure.

Leur méthode d'évaluation s'est notamment basée sur la théorie des couleurs⁷. Ainsi, 20 participants ont évalué la plausibilité perçue dans l'environnement avec chacune des quatre caractéristiques précédentes à leur plus haut niveau. Ensuite, en partant d'un réglage bas sur chacune des caractéristiques, les participants devaient faire des transitions de configuration jusqu'à arriver à une configuration reproduisant le niveau de plausibilité initial. Les résultats, basés sur l'analyse des transitions, ont montré que l'environnement et le regard des musiciens virtuels étaient les facteurs les plus influents sur le degré de plausibilité.



FIGURE 1.12 – Image de gauche : point de vue d'un participant situé dans un environnement représentant une performance de quatuor à cordes virtuel [8]. Image de droite : avatar d'un participant situé dans un environnement virtuel représentant un bar virtuel [9].

Dans la même lignée, Skarbez et al. [9] ont étudié la plausibilité en utilisant des techniques de correspondance subjective similaires à celles utilisées dans la science des couleurs : 21 participants ont d'abord été exposés à un environnement virtuel représentant un bar avec un haut niveau de cohérence (voir figure 1.12). Ils ont ensuite choisi - au travers de transitions - la configuration avec un niveau de cohérence leur procurant le même degré de plausibilité. À chaque transition, les participants pouvaient modifier l'une des quatre caractéristiques suivantes :

7. La théorie des couleurs tente d'expliquer la manière dont nous percevons les couleurs, comment celles-ci se mélangent entre elles, les messages subliminaux - souvent culturels - qu'elles communiquent, ainsi que les méthodes connues pour répliquer une couleur donnée.

le comportement des avatars dans l'environnement, le comportement de leur propre corps, le comportement des objets ou l'apparence de l'environnement. Les résultats ont montré que les participants avaient tendance à choisir les améliorations de leur propre corps virtuel avant toute autre amélioration.

Pour résumer, les méthodes psycho-cognitives offrent une nouvelle façon de mesurer l'impact de la présence par la possibilité de modifier divers caractéristiques de l'environnement. Comme elles n'ont pas encore été très utilisées pour mesurer la présence, il est trop tôt pour discuter de leur fiabilité. Néanmoins, ces premiers résultats inciteront logiquement les chercheurs à approfondir le sujet.

Cette section traitant des mesures de la présence montre qu'il s'agit d'un domaine de recherche encore très actif mais surtout, qu'**aucune des méthodes proposées ne peut prétendre évaluer pleinement et de façon univoque la sensation de présence**. C'est pourquoi l'utilisation de plusieurs mesures de différents types lorsque cela est possible est vivement encouragée.

Cette thèse s'articulant autour de la présence spatiale, la section suivante est dédiée à l'approfondissement de la compréhension de cette sensation à travers l'analyse de ses déclinaisons dans différents environnements immersifs. En particulier, la démarche sous-jacente à cette analyse était d'élaborer le cahier des charges à suivre dans la mise en place et la conduite des expérimentations durant la thèse.

1.6 La présence spatiale dans différents environnements

Comme dit plus haut, la présence spatiale est communément définie comme la sensation d'être là. Le terme « là » peut désigner n'importe quel espace, qu'il soit réel ou virtuel. On peut donc définir la présence spatiale comme **la sensation d'être physiquement situé(e) dans n'importe quel type d'environnement**, que l'environnement soit réel (physique) ou généré par ordinateur (virtuel), et qu'il soit médiatisé par des technologies ou non.

Or certains facteurs, jouant un rôle dans l'émergence de la présence spatiale, peuvent être plus au moins « actifs » selon l'environnement (ex. la cohérence de l'espace [39]) et sont de fait susceptibles d'engendrer un degré de présence spatiale variable. Il est donc important de différencier les expériences de la présence spatiale en fonction de l'environnement dans lequel les utilisateurs se situent.

Sur la base des travaux de Zhao [35], la présence spatiale peut ainsi être divisée en trois catégories : la présence spatiale proximale, la présence spatiale distante et la présence spatiale virtuelle.

1.6.1 Présence spatiale proximale

Si l'environnement est réel et non médiatisé (i.e. perçu sans moyens technologiques), l'utilisateur fait l'expérience d'une présence dite proximale, également appelée « présence naturelle » ou « présence non médiatisée » [56]. C'est la présence dont nous faisons tous l'expérience dans notre vie quotidienne sans en avoir forcément conscience [35]. En d'autres termes, c'est la sensation naturelle de se sentir dans le monde réel, par opposition aux mondes médiatisés et virtuels. En outre, on supposera dans cette thèse que cette sensation fait l'objet d'un consensus fondamental en ce qu'elle participe de notre état physiologique de base. Nous ferons ici volontairement abstraction d'états de conscience modifiée (méditation, stupéfiants) qui pourraient conduire à des sensations de présence proximale altérées, l'exploration de ces états de présence dépassant le cadre de la présente thèse.

1.6.2 Présence spatiale distante

Si l'environnement est réel mais médiatisé, c'est-à-dire qu'il est considéré comme distant dans le temps et/ou dans l'espace, l'utilisateur fait alors l'expérience d'une « présence spatiale distante » mieux connue sous le nom de « téléprésence » [30]. Comme dit précédemment, si certains chercheurs considèrent la téléprésence comme équivalente à la présence spatiale, cette dernière est plus générale car indépendante des technologies [12]. Cela nous amène à constater que **la téléprésence, à l'origine du concept de présence, représente aujourd'hui le cas particulier de l'expérience de la présence spatiale dans le contexte spécifique des environnements distants.**

1.6.3 Présence spatiale virtuelle

Si l'environnement représente un monde virtuel inexistant, c'est-à-dire qu'il est généré par ordinateur, l'utilisateur fait l'expérience d'une « présence spatiale virtuelle » [15, 16].

Depuis l'apparition du concept, l'expérience de la présence en environnements virtuels a été grandement étudiée, menant à la conception de divers environnements virtuels ayant pour objectif principal d'imiter les expériences perceptuelles du monde réel [148, 48, 149, 98]. Nous reviendrons plus en détails sur ces études dans le chapitre 3.

Avec l'évolution et la démocratisation des technologies de RV mais aussi de Réalité Augmentée (RA), de nombreuses applications sont développées afin de tirer parti de la qualité grandissante des outils de simulation d'environnements virtuels. En particulier, les applications basées sur la Réalité Mixte sont sujettes à un intérêt grandissant, poussées par le développement de casques plus performants, par exemple l'Hololens de Microsoft⁸.

Ceci a donné lieu à l'apparition d'un nouveau type d'environnements, à savoir les environnements de réalité mixtes mêlant le réel et le virtuel. Ces environnements pouvant potentiellement engendrer une sensation de pré-

8. <https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens>

sence spatiale variables chez leurs utilisateurs, nous avons voulu ajouter une quatrième catégorie à la classification initiale de Zhao à savoir, « la présence spatiale en réalité mixte ».

1.6.4 Présence spatiale en réalité mixte

La Réalité Mixte (RM), parfois également appelée « Réalité Hybride » est la fusion (ou le mélange) du monde réel avec un monde virtuel [150]. Ce mélange produit un environnement où les objets physiques du monde réel et numériques du monde virtuel coexistent et peuvent interagir en temps réel.

Les environnements de RM soulèvent un certain nombre de défis importants pour notre compréhension de la présence. Nous verrons dans le prochain chapitre que certains facteurs liés à l'environnement et à l'utilisateur influencent la présence spatiale [151]. Une question centrale est donc de savoir comment aborder la conception et l'évaluation des environnements de RM afin de promouvoir une sensation de présence appropriée en relation à la fois avec le monde réel et l'expérience RM médiatisée.

Regenbrecht et Schubert [152] ont été les premiers à poser cette question dans le contexte spécifique des environnements en RA et ont développé un questionnaire pour la sensation de présence dans de tels environnements. De même, Goldiez et Dawson [153] ont examiné si la présence était « *présente* » dans les systèmes de RA. Dans le contexte plus large des environnements de RM, Schaik et al. [154] ont cherché à identifier les facteurs associés à la présence en utilisant des techniques d'auto-évaluation.

L'évaluation de la présence spatiale en réalité mixte est un domaine où beaucoup reste à faire. La thèse étant, par essence, limitée dans le temps, nous n'avons pas eu l'opportunité de l'étudier. Le lecteur avide d'informations concernant ce sujet peut néanmoins lire le rapport très complet de Wagner [155] qui évalue le potentiel de différentes applications expérimentales de RM pour engendrer différentes formes de présence.

La figure 1.13 illustre la classification de la présence spatiale en fonction de l'environnement.

1.6.5 Comparaison entre les catégories

L'intérêt d'une classification de la présence spatiale en fonction du type de l'environnement est de pouvoir mettre en évidence les différences mais aussi les similitudes de chaque environnement. En outre, la comparaison de ces environnements permet d'identifier les facteurs les plus influents dans l'émergence de la présence.

Dans cette optique, Zhao a souligné l'importance de comparer la sensation de présence ressentie par les utilisateurs en environnements virtuels et distants avec la présence naturelle (en environnement réel), cette dernière représentant par définition le niveau de présence le plus élevé qu'une personne puisse connaître [35]⁹. La présence naturelle peut donc être considérée **comme une base de référence dont les autres présences médiatisées doivent se rapprocher au maximum.**

9. On pourrait débattre du fait que l'on pourrait se sentir « encore plus présent » dans un environnement virtuel. On verra dans la suite que de telles distorsions de présence sont parfois relevées par des mesures objectives, ce qui prête à discussion.

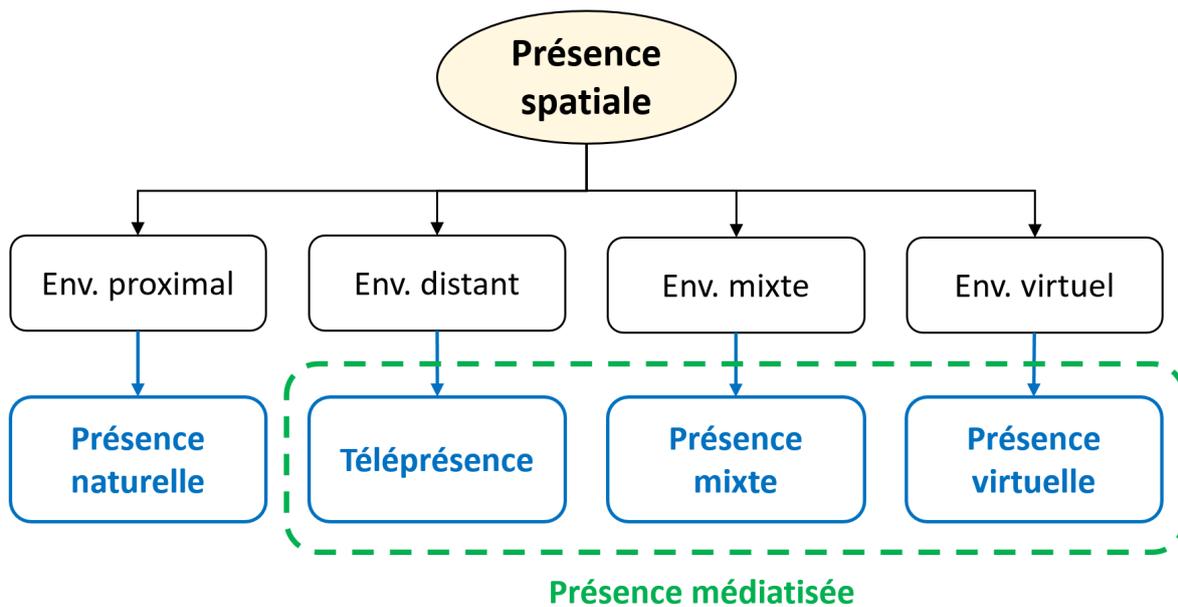


FIGURE 1.13 – Classification de la présence spatiale en fonction de l'environnement auquel l'utilisateur est exposé.

Cependant, il faut noter que si de nombreuses études ont évalué la présence entre les environnements réels et virtuels, l'évaluation de la présence spatiale en environnements distants souffre d'un manque d'intérêt. Nous revenons plus en détails sur cette problématique dans le chapitre 3.

1.7 Conclusion

Ce chapitre s'est efforcé de présenter un panorama de la littérature autour de la sensation de présence en général et de la présence spatiale en particulier. Nous avons d'abord déterminé l'origine de la présence dans les systèmes de téléopération et les environnements virtuels. Puis, nous avons passé en revue les différentes définitions assignées au terme, la définition la plus couramment acceptée étant « la sensation d'être là ».

Dans un second temps, nous avons défini les formes principales découlant de cette sensation, à savoir la présence de soi, la présence sociale et la présence spatiale. En particulier, la relation entre la présence sociale et la présence spatiale a été analysée.

Les différentes méthodes d'évaluation de la présence ont ensuite été présentées. Ces dernières ont été divisées en méthodes subjectives d'auto-évaluation (principalement les questionnaires de présence) et en mesures objectives basées sur les performances des utilisateurs, les observations comportementales, les indicateurs physiologiques et les nouvelles méthodes psycho-cognitives.

Cette thèse s'articulant principalement autour de la présence spatiale, la dernière partie du chapitre a présenté une description du concept au travers d'une classification de l'expérience de la présence spatiale dans différents environnements immersifs réels, distants, mixtes et virtuels. L'intérêt d'une telle classification est de pouvoir comparer

le degré de présence spatiale dans différents environnements caractérisés. Une telle comparaison est nécessaire pour mieux comprendre quels sont les critères ou facteurs, plus ou moins génériques aux différents environnements, qui influencent la sensation de présence spatiale.

Dans le prochain chapitre, nous présentons ces facteurs ainsi que les modèles conceptuels qui en découlent. Pour rappel, l'objectif de cette thèse est de conceptualiser la présence spatiale au travers d'un modèle valide dans des environnements immersifs réel, distant et virtuel (dont on a espoir qu'il pourra être applicable aux environnements mixtes). Aussi, nous présentons donc dans le prochain chapitre - après analyse des modèles existants dans la littérature - une première ébauche de notre modèle.

English Summary

This chapter reviews the literature on the feeling of presence in general and **spatial presence** in particular. It starts by determining the origin of presence, first called « *telepresence* », in teleoperation systems. Then, it reviews the different definitions assigned to presence particularly in the context of virtual environments, where the most commonly accepted definition is the feeling of « *being there* » [30].

In a second step, the main forms (dimensions) arising from this feeling are presented, namely :

- Self-presence refers to the user's feeling that « *his/her body is part of the environment* » [14].
- Social presence refers to the user's feeling of « *being with other entities (humans or not)* » [68].
- Spatial presence that we defined as « **the user's feeling of being located in an environment whether it is real, mediated by technology, or synthesized by computer** ».

In the third part of this chapter, the different tools for evaluating presence are presented. They are divided into subjective **self-assessment methods (mainly using presence questionnaires)** and objective measures based on **performance and behavioral observations, physiological indicators, and new psycho-cognitive methods**.

As this thesis focuses on spatial presence, the last part of the chapter presents an in-depth description of the concept through a classification of the experience of spatial presence in **real, remote, mixed, and virtual immersive environments**. The interest of such a classification is to be able to compare different characterized environments and highlight the criteria or « *factors* » that influence the sensation of spatial presence.

In the following chapter, these factors as well as the conceptual models derived from them are presented.

————— CHAPITRE 2 —————

**CONCEPTUALISATION DE LA PRÉSENCE
SPATIALE**

2.1 Introduction et motivation

Comme vu dans le chapitre précédent, la complexité grandissante du concept de présence a poussé les chercheurs à proposer des définitions divergentes selon leurs objectifs et domaines d'expertise. Aussi, différentes formes de présence ont vu le jour pour répondre à la multi-disciplinarité et multi-dimensionalité du concept.

Parmi ces formes, la **présence spatiale** a particulièrement intéressé les chercheurs en Réalité Virtuelle (RV) visant à améliorer l'efficacité de leurs systèmes [79, 81, 82, 80]. Ces derniers ont mené de nombreuses études dans le but de comprendre son processus de formation et trouver des moyens valides de mesurer son intensité dans différents environnements, mais aussi pour apprendre à prédire la variabilité de cette sensation selon l'utilisateur et son environnement. En particulier, différents facteurs plus au moins influents ont été déterminés comme jouant un rôle dans l'émergence de la présence spatiale, tels que le niveau de fidélité sensorielle de la technologie [119], l'affordance de l'environnement [46] ou encore l'attention que l'utilisateur accorde à une tâche [156]. Ces facteurs ont très vite été rassemblés pour former différents **modèles conceptuels**.

Ainsi, de nombreux modèles ont été proposés dans le but d'expliquer la formation de la présence spatiale (ex. [157, 12]). Cependant, en raison de la diversité des approches adoptées pour déterminer les facteurs et des relations peu claires entre ces approches, ces modèles conduisent à une opérationnalisation non systématique et incohérente du concept [56]. Comme le notent Waterworth et al. [158] (p. 36) : « *les confusions terminologiques sur ce qui constitue une présence et ce qui n'en constitue pas ont entravé les progrès dans le domaine. À l'heure actuelle, aucune théorie unifiée de la présence n'est possible, car le mot « présence » est utilisé différemment par différents chercheurs* ». Ainsi, **aucun consensus n'a été dégagé autour de la conceptualisation de la présence spatiale**. Pourtant, pour la présence comme pour tous les autres champs d'investigation scientifiques, les chercheurs et les théoriciens doivent avoir une compréhension commune de la signification des concepts qu'ils utilisent [13].

C'est pour répondre à cette problématique que nous introduisons dans ce chapitre notre première tentative de conceptualisation unifiée de la présence spatiale. L'adoption d'un cadre commun autour de la conceptualisation de ce phénomène permettrait de communiquer et de collaborer entre chercheurs plus efficacement, de comparer des propositions théoriques et des résultats empiriques au sein et entre les disciplines et en fin de compte, d'acquérir et de caractériser plus précisément les connaissances acquises sur la présence spatiale.

Objectifs et plan du chapitre

L'objectif principal de ce chapitre est d'introduire un modèle de la présence spatiale prenant en compte les différentes approches et théories qui existent dans la littérature.

Pour ce faire, la première partie du chapitre introduit les principales approches suivies par les chercheurs pour déterminer les facteurs de la présence spatiale. Ces facteurs sont alors décrits au travers de ces approches. Dans

la deuxième partie du chapitre, les modèles conceptuels rassemblant divers facteurs sont analysés. Le but de cette analyse est de mettre en lumière les similitudes et les différences des modèles mais aussi leurs limitations. Le chapitre se conclut par l'introduction d'une première version de notre modèle conceptuel de la présence spatiale.

2.2 Détermination des facteurs

Pour déterminer les facteurs qui ont le plus d'influence sur la présence spatiale, les chercheurs ont adopté différentes approches explicatives de la présence. Nous avons choisi de diviser ces dernières en quatre approches principales, à savoir :

- L'approche **technique** qui donne une place centrale au système qui génère/médiatise l'environnement.
- L'approche **rationnelle** qui associe la sensation de présence au succès de la tâche.
- L'approche **écologique** qui met en avant l'affordance de l'environnement et sa cohérence.
- L'approche **psychologique** qui met l'accent sur les caractéristiques psychologiques et individuelles des utilisateurs.

Nous allons maintenant décrire les facteurs les plus influents au travers des ces quatre approches.

2.2.1 L'approche technique

Cette approche est suivie par les chercheurs « techno-centrés » qui affirment que la formation de la présence est avant tout dépendante de la capacité du système à fournir aux utilisateur un environnement sensori-moteur riche reproduisant le plus fidèlement possible les sensations du monde réel [49, 159]. En d'autres termes, cette approche met l'accent sur les facteurs de fidélité sensorielle et comportementale du système, que l'on définit plus communément comme l'immersion et l'interaction.

L'immersion

Faisant tantôt référence à la « transparence » de l'interface utilisateur [117, 17, 160] et tantôt au « réalisme sensorielle » de l'environnement généré [40, 14], l'immersion est définie - dans une acception technique du terme - comme la capacité du système à produire une expérience la plus fidèle possible du point de vue sensoriel [119]. De cette façon, l'immersion est considérée comme une caractéristique quantifiable du système comprenant trois aspects techniques :

1. La fidélité sensorielle de chaque canal de médiation faisant référence à la mesure dans laquelle les stimuli sensoriels produits par un système sont identiques à ceux produits dans le monde réel [161]. Elle est désignée dans la littérature comme la « vivacité » du système (vividness) [56], son « étendue » (extensiveness) [17] ou encore sa « profondeur » (depth) [30]. Ces canaux de médiation peuvent aussi bien être visuels, auditifs, tactiles qu'haptiques [162, 78].

2. Le nombre de canaux sensoriels entrants ou sortants, appelé également « engagement sensoriel » [32] ou « envergure » du système (breadth) [30], et faisant référence à la mesure dans laquelle tous les sens de l'utilisateur sont connectés au système.
3. La cohérence des informations médiatisées entre les canaux sensoriels [40].

L'impact de l'immersion sur la formation de la présence a fait l'objet de nombreuses discussions théoriques et d'études empiriques depuis plus de 30 ans. On se référera à la méta-analyse [119] qui récapitule 83 travaux publiés reliant l'immersion à la présence. Cette méta-analyse révèle une influence positive certaine de l'immersion sur l'émergence de la présence.

L'interaction

Le niveau d'interaction d'un système fait référence à la mesure dans laquelle les utilisateurs peuvent participer à la modification du contenu d'un environnement en temps réel [30]. Cela est notamment rendu possible grâce au suivi des mouvements des utilisateurs, la capture de leur morphologie et la mise en correspondance de leur corps physique avec un corps virtuel - notamment à l'aide d'avatars - ainsi que la possibilité d'explorer l'environnement.

Selon [49], ce facteur est au moins aussi important que le niveau d'immersion. Interagir avec le système permet de **modifier la perception**¹ qu'ont les utilisateurs de l'environnement et de renforcer la sensation de réalisme sensoriel induite par l'immersion [163].

Comme l'interaction n'est véritablement efficace que si la réponse de l'environnement est perçue comme « instantanée » par les utilisateurs [164], une condition nécessaire au succès des interactions est la faible **latence du système**. Au vu de son importance - surtout dans le contexte des environnements distants - nous avons choisi de considérer la latence comme un facteur à part entière.

La latence

La latence se réfère aux délais de réponses du système et aux interruptions - en particulier d'affichage - qui peuvent se produire pendant l'exposition d'un utilisateur à un environnement [160]. Une faible latence est essentielle à la **coordination sensorimotrice** (i.e. la corrélation appropriée et immédiate entre les actions de l'utilisateur et les retours sensoriels du système [32]). Ainsi, une latence trop forte entraîne des perturbations chez les utilisateurs susceptibles de réduire leur sensation de présence [86] et allant jusqu'à induire un mal du simulateur (cybersickness) [165, 166]. A l'inverse, les applications à faible latence peuvent créer une meilleure illusion de mouvements continus et de réponses rapides de l'environnement aux actions des utilisateurs et donc augmenter la présence ressentie dans cet environnement [167].

1. Pour aller plus en détail, la modification de la perception est en fait une conséquence de la volonté d'action des utilisateurs qui sont dès le début au centre d'une boucle « perception/action ».

2.2.2 L'approche rationnelle

L'approche rationnelle tire ses origines de livre de Heidegger : « *Being and time* » [168], dans lequel il affirme que la réussite dans la tâche ou la capacité à travailler correctement procure une meilleure qualité d'expérience qui conduit à un niveau de présence de soi plus élevé. En d'autres termes, plus l'utilisateur accomplit ses tâches avec succès, plus il se sent présent.

Le succès de la tâche

Selon Schloerb [76], la présence « *subjective* » se produit lorsque l'on se perçoit comme physiquement présent dans un environnement. Cependant, on n'est « *objectivement* » présent que si l'« *on peut accomplir avec succès une tâche spécifique dans l'environnement* ». Il affirme également que la capacité à accomplir la tâche devrait être le critère le plus important. De même, Sheridan [15] soutient que la présence dépend probablement de la tâche et que les caractéristiques « *fixes* » de l'expérience (facteurs d'immersion et nature de la tâche) devraient affecter les mesures dépendantes de l'expérience de l'utilisateur telles que la présence et l'exécution de la tâche.

Ces revendications sont portées par plusieurs études démontrant une corrélation entre la performance et la sensation de présence [3, 116], quand d'autres affirment qu'aucun rapport n'existent entre les deux [108, 169, 118]. Comme dit dans le chapitre précédent (section 1.5.2), ce manque de consensus peut s'expliquer par le fait que **la relation entre la présence et la performance peut être influencée par les techniques d'interaction utilisées pour accomplir la tâche**, ces dernières pouvant fortement impacter les performances de l'utilisateur sans affecter sa sensation de présence [122]. De plus, la nature de la tâche et les actions des utilisateurs peuvent indirectement influencer leur niveau de présence [11]. La figure 2.1 illustre ce lien « indirect » entre la présence et la performance via les techniques d'interaction

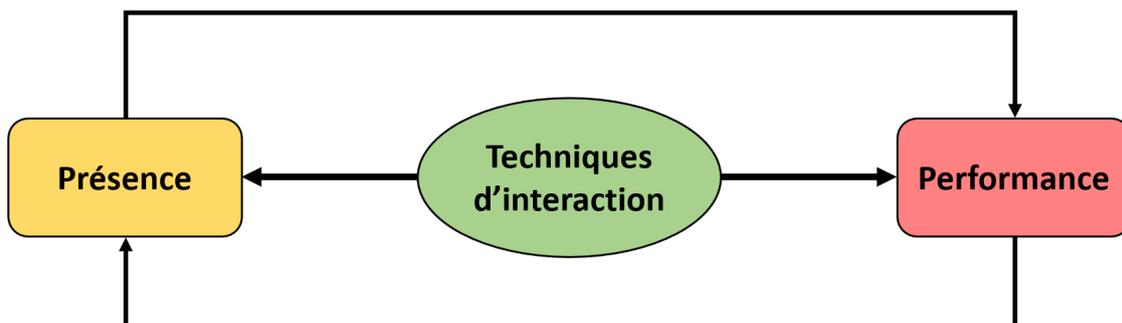


FIGURE 2.1 – Schéma récapitulatif de la relation entre la présence et performance et de l'influence des techniques d'interaction sur cette relation.

2.2.3 L'approche écologique

L'approche écologique est née de la théorie de la perception selon laquelle « *une personne perçoit son environnement en fonction des **affordances** qui lui sont offertes* » [45]. Le terme « affordance » a été utilisé pour la première fois par Gibson [52] qui l'a défini comme l'« *ensemble des possibilités ou opportunités d'actions que l'environnement offre à son utilisateur* ». Ces possibilités peuvent varier d'un utilisateur à l'autre selon son éducation, sa culture et ses expériences antérieures [46, 170].

Partant de cette théorie, plusieurs facteurs relatifs à l'environnement ont été proposés comme renforçant la sensation de présence, les plus importants sont la possibilité d'actions dans l'environnement, l'adéquation entre les attentes de l'utilisateur et sa perception de l'environnement, le degré de réalité attribué à l'environnement et son niveau de cohérence.

La possibilité d'actions

Pour Slater et al. [19], la sensation d'« être là » dans un environnement est fondée sur la capacité de « faire là ». Riva et al. [171] vont plus loin en définissant la présence comme la « *sensation de faire là* » offerte par l'environnement. Pour eux comme pour plusieurs autres chercheurs, plus l'utilisateur perçoit un nombre d'actions élevées dans l'environnement, plus sa sensation de présence augmente [5, 45].

Dans la même idée, Regenbrecht et Schubert [163] affirment que la nature cognitive de la présence suggère que la perception de la capacité d'action de l'environnement renforce à elle seule la sensation de présence de l'utilisateur : « *c'est la **possibilité d'agir** qui façonne la représentation mentale de l'utilisateur de son environnement et qui influence son degré de présence* ». En d'autres termes, aucune interaction objective entre l'utilisateur et l'environnement n'est nécessaire pour engendrer une sensation de présence. A noter que cette idée suppose cependant que l'utilisateur connaisse ses possibilités d'action a priori, ce qui rend inévitable **une expérience similaire préalable** avec une connaissance des outils d'interactions disponibles.

L'adéquation entre les attentes et la perception

L'affordance d'un système ou d'un objet dépend également de l'**intention d'action** de l'utilisateur et de la réalisation ou non de cette intention. Ainsi, un environnement qui se comporte (i.e. offre une réactivité) conformément aux attentes d'un utilisateur conduira à une sensation de présence plus élevée [171, 172]. Dans leur étude, Nunez et Blake [10] ont notamment démontré que les utilisateurs se sentaient plus présents dans un environnement pauvre du point de vue immersif (environnement virtuel textuel) mais dans lequel ils pouvaient agir de manière à atteindre leurs objectifs, que dans un environnement plus immersif (environnement graphique en 3D) mais dans lesquels ils ne pouvaient pas agir correctement (voir figure 2.2).

En outre, une correspondance optimale entre les actions de l'utilisateur et le retour sensoriel fourni par l'environ-

nement aide à la construction d'une représentation de soi dans l'environnement, car les utilisateurs peuvent alors s'« engager dans un cadre de référence égocentrique où leur représentation de soi coïncide avec le point de vue à partir duquel l'environnement est expérimenté » [31]. Cette représentation peut induire la sensation d'un « corps virtuel » [31], voir une présence de soi [173, 56] influant sur la sensation d'être là.

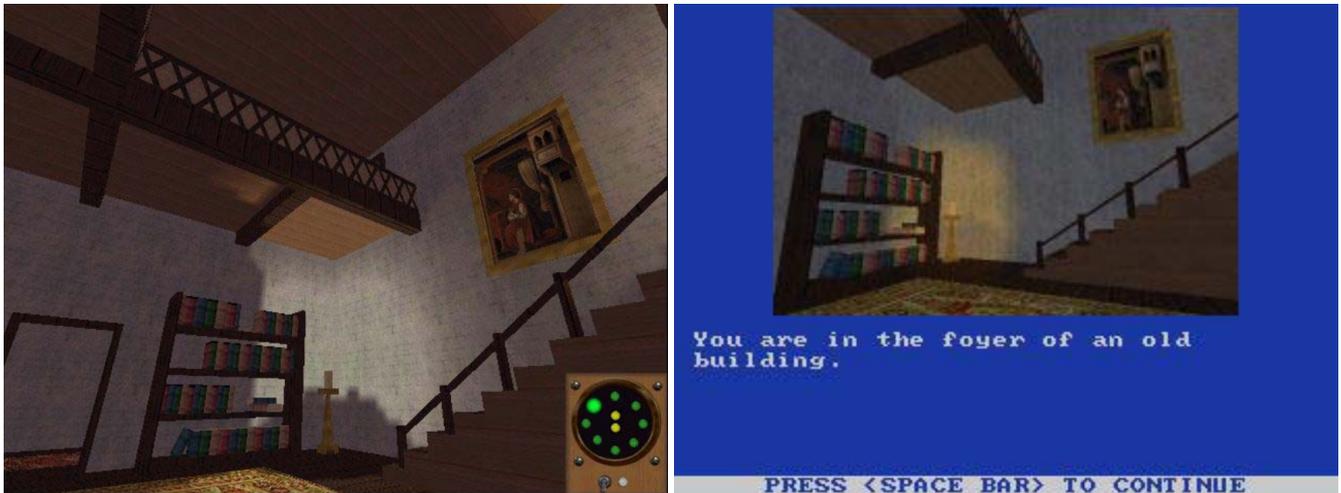


FIGURE 2.2 – Image de gauche : un environnement de haute qualité visuelle (très immersif). Image de droite : la version « textuelle » du même environnement [10].

Par ailleurs, Zahorik et Jenison [44] ont décrit la présence comme « *l'équivalent d'une action soutenue avec succès dans l'environnement* ». Cette définition a cela d'intéressant qu'elle se base sur l'approche écologique tout en reprenant le facteur de succès de la tâche associé à l'approche rationnelle. Or, pour eux, la présence ne se résume plus au succès de la tâche mais à celui de toute action entreprise au sein de l'environnement. Précisément, ils déterminent la présence par la mesure dans laquelle **le couplage perception/action dans l'environnement médiatisé correspond au couplage perception/action appris dans le monde réel**. En d'autres termes, « *si la réponse de l'environnement médiatisé aux actions de l'utilisateur est perçue comme licite (i.e. proportionnelle à la réponse qui serait apportée dans le monde réel dans lequel nos systèmes perceptifs ont évolué) alors l'environnement soutient avec succès les attentes de l'utilisateur et sa sensation de présence augmente* » [44] (p. 87).

La réalité de l'environnement

Baños et al. [174] ont introduit la notion de « *jugement de réalité* » de l'environnement comme étant « *la croyance que nos expériences sont réelles* » tout en soulignant son lien avec la sensation de présence. Schubert et al. [175, 163, 101] ont également proposé le degré de « *réalité perçue* » par un utilisateur situé dans un environnement comme facteur principal de leur questionnaire de présence. A noter que **la « réalité » de l'environnement ne doit pas être confondue avec le « réalisme sensoriel et d'interaction »** qui lui, est lié à l'immersion et l'interaction du système et fait référence à la correspondance de la perception sensori-motrice entre une expérience médiatisée par la technologie et une expérience similaire dans le monde réel.

Cette notion « réalité » a été reprise par plusieurs chercheurs. Par exemple, Lombard et Ditton [51] ont défini le « réalisme social » comme « *la mesure dans laquelle une représentation médiatique est perçue comme plausible ou fidèle à la réalité en ce qu'elle reflète des événements qui se produisent ou pourraient se produire dans le monde non médiatisé* ». De même, Slater [39] a défini l'« *illusion de plausibilité* » comme étant « *la croyance que l'expérience dans l'environnement se réalise réellement* ». Plus récemment, Gilbert [176] a introduit le concept d'« *authenticité* » qu'il a défini comme la mesure dans laquelle l'environnement médiatisé soutient (1) les attentes des utilisateurs basées sur leurs antécédents dans le monde réel et (2) les intentions des utilisateurs dans l'environnement.

La cohérence

En se basant sur la notion de plausibilité introduite par Slater [39], Skarbez et al. [145] ont défini la cohérence comme « *l'ensemble des circonstances raisonnables qui peuvent se produire dans l'environnement sans introduire de circonstances déraisonnables* ». Par « *circonstance raisonnable* », les auteurs font référence à un événement qui est « évident » ou « logique » compte tenu des connaissances préalables de l'utilisateur de l'environnement. La notion de cohérence se détache ainsi de celle de réalité ou de plausibilité par le fait qu'elle recouvre aussi les expériences de RV dont le scénario n'est pas forcément réaliste. Par exemple, si un utilisateur est amené à croire qu'il ou elle va faire l'expérience d'un monde fantastique virtuel, alors l'apparition d'un dragon crachant du feu sera un comportement cohérent. A contrario, si l'utilisateur croit être dans une représentation virtuelle réaliste de la tour Eiffel, le même comportement sera incohérent et diminuera probablement sa sensation de présence dans l'environnement (voir figure 2.3). Pour résumer, la cohérence dépend de la logique interne de l'expérience [9].

2.2.4 L'approche psychologique

Pour les psychologues, l'expérience de la présence ne doit pas seulement concerner les caractéristiques du système et de l'environnement, mais aussi prendre en compte les caractéristiques psychologiques des utilisateurs [12, 101, 18, 51] principalement l'implication [177], la volonté de suspendre l'incrédulité [12] et l'intérêt pour l'activité [156].

L'implication

L'implication fait référence à la mesure dans laquelle l'utilisateur se sent absorbé et attiré par l'environnement [157]. Il est souvent associé à des concepts distincts mais étroitement liés tels que l'engagement [34], l'absorption [156] et l'immersion psychologique [101]. Plus précisément, l'implication est un état psychologique vécu du fait de la concentration et de l'attention de l'utilisateur sur un ensemble cohérent de stimuli et d'événements dans l'environnement (il implique de ce fait un lien fort avec le contenu et/ou la forme de l'expérience).

Plusieurs chercheurs ont considéré l'implication comme un facteur important dans l'émergence de la présence [157, 178, 179, 41]. Witmer et Signer [40] affirment que « *plus un utilisateur concentre son attention sur l'environne-*



FIGURE 2.3 – Deux images illustrant une attaque de dragon. L'image du haut est cohérente avec le scénario de l'environnement virtuel alors que la seconde est réaliste mais présente un faible niveau de cohérence car elle représente le monde réel.

ment plutôt que sur des distractions extérieures, plus il se sent présent dans l'environnement ». Lombard et Ditton [51] notent que « *lorsque les utilisateurs ressentent une présence immersive, ils sont impliqués, engagés et absorbés* ». Le facteur se retrouve également dans plusieurs questionnaires de présence comme le WS [40], l'IPQ [101] et l'ITC-SOPI [34].

La suspension de l'incrédulité

Slater et Usoh [38] ont défini la présence ressentie dans un environnement médiatisé comme « *la suspension de l'incrédulité que l'on est dans un autre monde que celui où se trouve son corps* ». Cette idée de présence impliquant la suspension de l'incrédulité est un concept récurrent dans la littérature. Plusieurs chercheurs soutiennent que l'effort mental actif et conscient pour suspendre sa propre incrédulité quant à l'authenticité des stimuli entrants est une condition préalable majeure pour que la sensation de présence émerge [159, 56, 180, 30]. En d'autres termes, pour se sentir présent, l'utilisateur doit avoir la volonté de suspendre son incrédulité quant au fait qu'il se trouve dans un environnement autre que celui où son corps est physiquement situé.

Cependant, d'autres chercheurs ne partagent pas ce point de vue et affirment qu'il nous est impossible de suspendre activement notre incrédulité. En effet, Worth expose dans [181] que lorsque nous entrons dans un monde fictif ou que nous laissons le monde fictif entrer dans notre imagination, « nous ne suspendons pas volontairement notre incrédulité ».

L'intérêt pour l'activité

Selon [156, 34], si la tâche est motivante ou fait partie des domaines d'intérêt de l'utilisateur, l'expérience devient plus plaisante et les utilisateurs sont plus susceptibles d'allouer des ressources attentionnelles à l'environnement, ce qui renforce par la suite leur sensation de présence.

Autres caractéristiques

D'autres traits contingents à l'utilisateur entrent dans la formation de la présence spatiale, à savoir :

Les préférences sensorielles de l'utilisateur. S'appuyant sur le modèle de programmation neuro-linguistique (PNL) selon lequel toute expérience est codée en termes des trois systèmes de représentation visuel, auditif et kinesthésique, Slater et al. [31, 38] expliquent qu'en fonction du système de représentation prédominant d'un utilisateur, son expérience dans l'environnement varie influençant par la même occasion son niveau de présence spatiale. Par exemple, les utilisateurs disposant d'un système de représentation auditif prédominant interpréteront principalement la spatialité en traitant les indices spatiaux auditifs fournis par l'environnement, tandis que les utilisateurs « plus visuels » se baseront sur les détails graphiques de l'environnement. Cela implique que la stimulation sensorielle appropriée pour évoquer la présence spatiale dépend également des préférences individuelles de l'utilisateur [182].

La familiarisation avec le système. Dans sa méta-analyse de la présence, Lee [56] affirme que plus un utilisateur utilise un système ou une technologie, plus il s'y habitue et plus sa sensation de présence est élevée. On peut expliquer cela par le fait qu'une fois habitué à l'utilisation d'un système, l'utilisateur ne ressent plus l'existence de ce dernier en tant que tel mais se transforme plutôt en une extension de ses sens et de son corps [183]. Toutefois, il

faut évidemment prendre en compte le fait qu'une exposition trop longue à un système peut augmenter le mal des simulateurs [165, 166].

Remarques :

Les deux approches rationnelle et écologique se rapprochant sur certains points, Sheridan [184] a tenté de les combiner en proposant « la théorie de l'estimation ». Cette théorie soutient la distinction entre la réalité objective et subjective supposée par Schloerb [76] mais affirme qu'il ne nous est pas possible, en tant qu'« *entité humaine subjective* », de réellement mettre le doigt sur la réalité objective. Au lieu de cela, nous « *élaborons et affinons continuellement un modèle mental qui estime notre vision de la réalité, en fonction de nos sens et de notre interaction avec cette réalité* ».

Pour résumer, les chercheurs ont proposé différents facteurs jugés plus au moins importants dans l'émergence de la présence spatiale selon l'approche adoptée. Par ailleurs, dans la quête de l'élucidation du phénomène, ces facteurs ont été regroupés pour construire différents modèles conceptuels. Dans la section suivante, nous présentons ces modèles, l'objectif n'étant pas de les critiquer mais plutôt de les catégoriser dans le but de promouvoir une conceptualisation standardisée de la présence spatiale.

2.3 Détermination des modèles

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent (section 1.3), la plupart des chercheurs sont d'accord pour définir la présence spatiale comme la sensation ou l'illusion d'être situé dans un environnement donné. Cependant, au-delà de ce point commun, les modèles de conceptualisation de la présence spatiale varient. Nous avons choisi de rassembler ces modèles en trois catégories principales selon leurs objectifs :

- Si l'objectif est de mettre en évidence les aspects techniques du système qui doivent être améliorés pour renforcer la sensation de présence spatiale, le modèle suit une **conception centrée sur la technique** ;
- Si l'objectif est d'expliquer le processus mental ou cognitif responsable de la formation de la présence spatiale dans l'esprit de l'utilisateur, le modèle suit une **conception centrée sur la cognition**.
- Et si l'objectif est de déterminer les différents facteurs qui contribuent ou qui composent la présence spatiale ainsi que de mettre en évidence leur degré d'influence, le modèle suit alors une **conception multifactorielle**.

Dans la suite de cette section, les modèles existant dans la littérature sont listés au travers de ces trois catégories. Pour établir cette liste, nous nous sommes aidés de différentes études bibliographiques à savoir [36, 185]. Certains de ces modèles sont purement théoriques et d'autres, de nature plus pragmatique, sont à la base de questionnaires de présence. Par conséquent, certains des modèles mentionnés dans cette section apparaîtront également dans le chapitre 4 où les questionnaires seront examinés plus en détail.

2.3.1 Les modèles techniques

La conceptualisation de la présence a évolué en partie en raison des progrès technologiques dans le domaine de la robotique et des systèmes de téléopération où le premier objectif des chercheurs et des ingénieurs est d'augmenter les performances des opérateurs [49]. Dans cette logique, ils ont proposé de renforcer la sensation de présence spatiale par le biais de l'amélioration des caractéristiques techniques des systèmes, notamment leur fidélité sensori-motrice, afin d'accroître le niveau d'immersion et d'interaction.

Sheridan : Immersion et Interaction (1992)

Dans son modèle, Sheridan [15] a proposé trois facteurs de présence : (1) l'étendue des informations sensorielles, (2) le contrôle de la relation des capteurs avec l'environnement et (3) la capacité à modifier l'environnement physique. Il soutient également que la présence dépend probablement de la tâche. Son modèle peut ainsi se résumer aux deux facteurs d'immersion et d'interaction générés par le système.

Zeltzer : Autonomie, Interaction, Présence (1992)

Zeltzer [164] a proposé le modèle d'autonomie, d'interaction et de présence (AIP) où il a défini l'autonomie comme la mesure dans laquelle « *l'environnement est capable de simuler les interactions naturelles* », l'interaction comme la mesure dans laquelle « *le système est capable de répondre aux entrées des utilisateurs en temps réel* » et la présence comme « *l'indice de fidélité des affichages et des contrôles* ». Par ce modèle, l'auteur soutient que l'autonomie et l'interaction sont les principales caractéristiques d'un système qui influencent l'émergence de la sensation de présence. A noter que sa définition de la présence s'apparente en fait au degré d'immersion du système tel qu'on le conçoit actuellement.

Barfield : Modèle de Fidélité Sensorielle Spatiale (1996)

Barfield et Hendrix [78, 186] ont également souligné l'importance d'une information sensorielle de haute qualité. Ils ont développé le modèle de Fidélité Sensorielle Spatiale (Spatial Sensory Fidelity model) qui comprend quatre caractéristiques propre au système : (1) le champ de vision géométrique (GFOV), (2) la parallaxe de mouvement (suivi de la tête), (3) le taux de mise à jour de l'affichage (latence) et (4) les indices de profondeur (perspective linéaire et aérienne, et occultation). A travers ce modèle, Barfield et Hendrix décrivent la présence comme dépendante de la mesure dans laquelle la perception sensorielle des objets dans un environnement médiatisé est similaire à la perception dans le monde réel.

Bystrom : Immersion, Présence, Performance (1999)

En se basant sur le modèle de Barfield et Hendrix décrit ci-dessus et les travaux de Slater et al. [187, 17] sur les types d'informations sensorielles requis pour effectuer une tâche, Bystrom et al. [11] ont élaboré le modèle d'Immersion, Présence et Performance (IPP) dans le contexte des environnements virtuels.

Le modèle explique la formation de la présence spatiale - définie dans son sens commun d'être là - par l'interaction entre trois facteurs : (1) l'immersion - définie comme la fidélité sensorielle du système -, (2) l'allocation des ressources attentionnelles et (3) la volonté de suspension de l'incrédulité. L'auteur affirme ainsi qu'un haut niveau d'immersion amène l'utilisateur à allouer des ressources attentionnelles à l'environnement virtuel et que cette allocation de ressources permet ensuite à l'utilisateur de faire l'expérience de la présence mais aussi d'accomplir la tâche donnée.

De plus, bien que basé en grande partie sur l'immersion, le modèle IPP prend également en compte l'approche rationnelle à travers la mise en lumière de la performance dans l'accomplissement de la tâche. En outre, le modèle suppose qu'il existe une boucle de rétroaction : plus d'attention allouée entraîne plus de présence, une présence plus élevée augmente les chances d'accomplir la tâche correctement (i.e. meilleure performance) et un engagement accru dans la tâche amène l'utilisateur à allouer plus de ressources attentionnelles (voir figure 2.4 pour une illustration de la boucle). Cette boucle est confirmée par une étude récente de Skarbez et al. [9]. Cependant, le point négatif de ce modèle est qu'il ne tient pas compte des facteurs écologiques comme l'affordance et la cohérence de l'environnement.

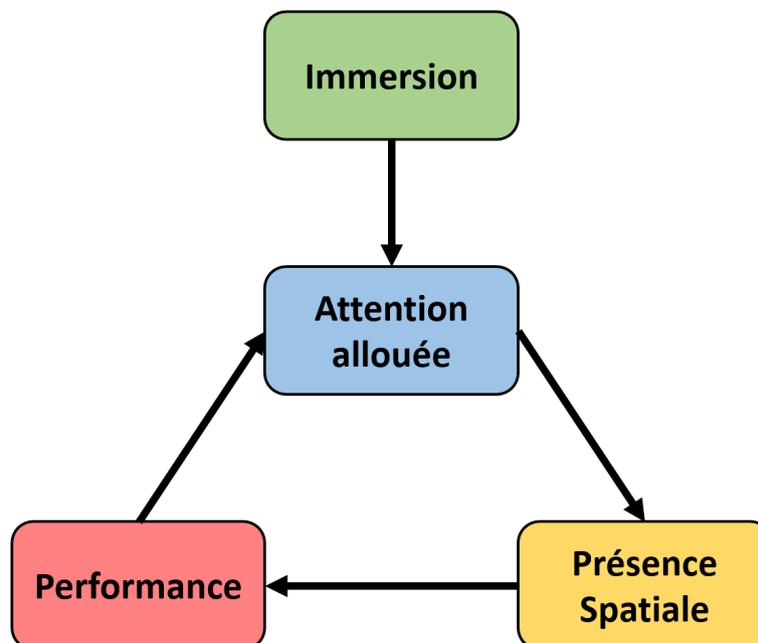


FIGURE 2.4 – Boucle de rétroaction explicitant la relation entre l'immersion, les ressources allouées, la présence et la performance [11].

2.3.2 Les modèles cognitifs

Ces modèles visent à déterminer les différentes étapes du processus mental de formation de la présence. Ils s'attachent également à mettre en évidence les facteurs associés à chaque étape. De par leur nature, ils sont davantage basés sur les approches écologiques et psychologiques tels que l'implication de l'utilisateur et sa capacité d'action dans l'environnement.

Draper : Attention allouée (1998)

Draper et al. [18] sont les premiers à avoir proposé un modèle cognitif basé sur les ressources attentionnelles qu'un utilisateur alloue durant l'expérience de la présence. Plus exactement, leur modèle soutient que le degré de présence ressentie augmente en fonction de la somme des ressources attentionnelles consacrées au traitement des stimuli provenant de l'environnement médiatisé mais aussi des ressources attentionnelles consacrées à surmonter les distracteurs du monde réel².

A travers ce modèle, les auteurs soutiennent donc que l'attribution de l'attention à différents types de stimuli est la clé déterminante de la présence. Ils proposent également « *la représentation cognitive de l'interaction* » de l'utilisateur avec l'environnement médiatisé (i.e. traitement des stimuli) et « *l'identification visuelle* » à l'avatar (i.e. l'incarnation) comme facteurs susceptibles de contribuer à une plus grande présence. Le modèle est aussi très influencé par l'approche technique et identifie différents facteurs sensoriels (résolution, champ de vision, cohérence de l'information entre les modalités et les écrans qui sont « *exempts de production de stimuli artificiels signalant leur existence* ») et différents facteurs moteurs (suivi des mouvements et réactivité de l'environnement aux actions de l'utilisateur).

Slater : Etat binaire et de Gestalt (2002)

Slater et al. [188] soutiennent que les informations sensorielles sont intégrées dans un modèle mental ou une « *Gestalt cognitive* » qui constitue la base de la présence spatiale. La Gestalt, aussi connue sous le nom de « théorie de la forme », est une théorie utilisée en psychologie qui stipule que le processus humain de perception traite les informations sous forme d'éléments structurés et non comme une addition ou une soustraction d'éléments [189].

L'idée principale est que les utilisateurs reçoivent des signaux spatiaux provenant d'environnements différents et souvent concurrents qu'ils doivent assembler dans une Gestalt cognitive cohérente. Les utilisateurs peuvent continuellement déplacer leurs ressources attentionnelles vers les signaux spécifiques appartenant à l'un des environnements. Selon le flux de données sur lequel ils s'appuient principalement pour interpréter une situation à un moment donné, leur Gestalt spatiale de référence peut correspondre davantage à un environnement plus qu'à un autre et c'est dans ce dernier qu'ils se sentent alors présents.

2. Il est fort probable que Bystrom [11] se soit basé sur ce modèle bien qu'il n'en fasse pas état dans son papier.

L'attention des utilisateurs passant en permanence d'un environnement à l'autre, une transition constante de la sensation de présence spatiale dans l'un ou l'autre environnement peut se produire : « *c'est l'équivalent du aha! Moment de la psychologie de la gestalt : le passage entre la vision du canard et du lapin, par exemple dans une figure multistable* » ([188], p. 437) (voir figure 2.5). Les auteurs qualifient cette transition de « rupture de présence » considérant la présence spatiale comme un état binaire : l'utilisateur se sent présent dans l'environnement ou non.

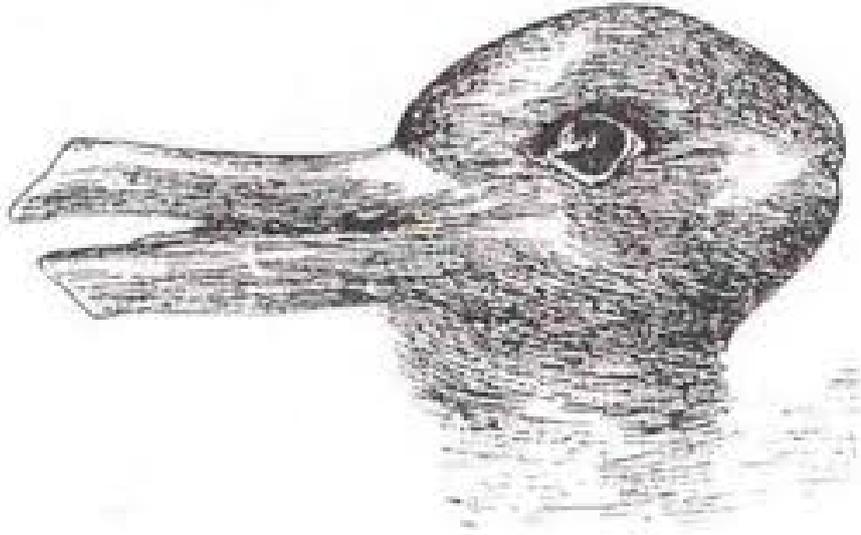


FIGURE 2.5 – Est-ce un canard ou un lapin ?

Schubert : Présence incarnée (1999)

Soulignant l'importance de la représentation mentale d'un utilisateur de l'environnement et de son corps dans cet environnement, Schubert et al. [33] ont développé le modèle de Présence Incarnée (Embodied Presence model). Ce modèle est basé sur un processus cognitif à deux niveaux décrivant l'émergence de la présence spatiale à travers :

1. La représentation des utilisateurs de leur propre corps (attribuée aux actions corporelles possibles dans l'environnement).
2. La suppression des sensations incompatibles (attribuée à l'implication des utilisateurs dans l'environnement).

A travers ce modèle, les auteurs tentent de séparer la représentation mentale de l'utilisateur de son corps dans l'environnement qu'ils définissent comme la « *présence incarnée* », du facteur attentionnel de la présence à savoir l'« implication » qui repose sur les caractéristiques psychologiques des utilisateurs.

Dans [101], ils conduisent une analyse factorielle et extraient huit facteurs qui sont - par ordre décroissant d'importance - la présence spatiale, la qualité de l'immersion, l'implication, la sensation d'être dans une histoire (i.e.

la cohérence narrative), la conscience de l'interface (i.e. la suspension de l'incrédulité), l'exploration de l'environnement, le niveau d'interaction du système et le degré de réalité de l'environnement. Ces facteurs sont ensuite regroupés en trois dimensions principales : (1) la sensation de présence spatiale, (2) l'implication de l'utilisateur et (3) le degré de réalité attribué à l'environnement [157].

Wirth : Hypothèse perceptuelle confirmée (2007)

Wirth et al. [12] ont développé un modèle intégratif de la formation de la présence spatiale à deux niveaux :

- Au premier niveau, les utilisateurs - après avoir alloué leur attention aux stimuli de l'environnement - construisent un modèle de localisation spatiale (en anglais, Spatial Situated Model ou SSM [190]), c'est-à-dire une représentation cognitive de l'environnement similaire à la notion de Slater de la Gestalt spatiale [188]. La formation de ce modèle de localisation implique des processus de construction basés sur les indices spatiaux dans l'environnement et des processus d'interprétation subjectifs [191]. De plus, il peut être adapté en permanence pendant l'expérience dans un environnement.
- Au deuxième niveau, les utilisateurs définissent inconsciemment un cadre de référence égocentrique primaire (en anglais, Primary Egocentric Reference Frame ou PERF), c'est-à-dire qu'ils commencent à croire soit au modèle de localisation spatiale du monde réel, soit à celui de l'environnement médiatisé, auquel cas ils se sentent présent dans cet environnement.

Ce modèle à deux niveaux fait référence à la théorie des « hypothèses perceptuelles » [192]. Il fait valoir que l'acceptation d'un cadre de référence est identique à la confirmation d'une hypothèse perceptuelle : si l'information spatiale de l'environnement est acceptée comme cadre de référence égocentrique primaire, la sensation d'être dans l'environnement devrait émerger. Les auteurs affirment ainsi que la présence spatiale se produit « *lorsque l'hypothèse du PERF est confirmée de manière répétée par des informations traitées et est donc stabilisée dans le temps* ».

En résumé, ce modèle met l'accent sur les mécanismes cognitifs qui sous-tendent la présence spatiale, à savoir le rôle d'un modèle de localisation spatiale et d'hypothèses perceptives. Il s'articule autour de deux étapes essentielles (voir figure 2.6) : (1) la construction d'un modèle mental de l'environnement atteint par « *l'affectation des capacités mentales à l'environnement* » (i.e. l'implication) et (2) la formation effective de la présence spatiale qui émerge par « *la confirmation d'une perception de localisation de soi dans l'environnement* » et dans la plupart des cas, par « *l'observation des actions possibles dans l'environnement* » (i.e. l'affordance). En plus des facteurs d'implication et d'affordance, les auteurs soulignent également la nécessité de considérer le rôle de l'immersion dans la formation de la présence spatiale.

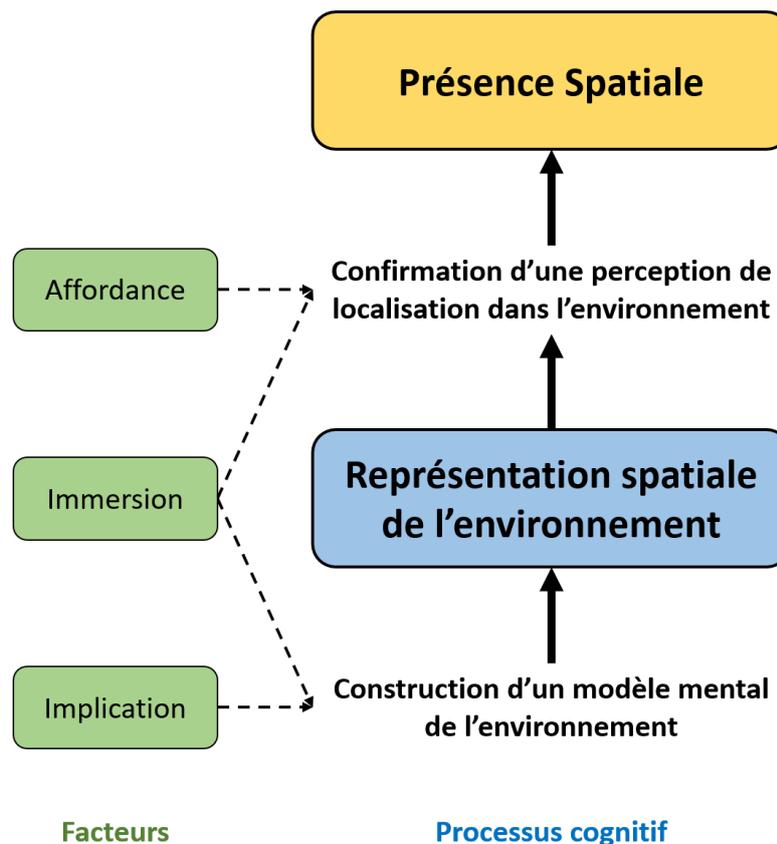


FIGURE 2.6 – Modèle de localisation spatiale et d'hypothèses perceptives proposé par Wirth et al. [12]

2.3.3 Les modèles multifactoriels

La présence spatiale étant plus susceptible d'être une construction multifactorielle ([193], p. 62), les chercheurs se sont concentrés sur la conceptualisation du phénomène en termes de facteurs issus de différentes approches. Par exemple, Slater et Wilbur [17] ont souligné la relation entre les capacités de la technologie (approche technique) et les exigences des tâches (approche rationnelle) et se sont concentrés sur la correspondance entre les stimuli sensoriels et la représentation mentale de l'environnement par l'utilisateur (approche écologique). Plus récemment, Mestre [50] a souligné l'importance de la résolution, de la latence et de la multisensorialité fournie par le système (approche technique), de l'implication de l'utilisateur (approche psychologique) et du scénario dans l'environnement (approche écologique).

En conséquence, plusieurs théories multifactorielles ont émergé, combinant différents facteurs interdépendants.

Facteurs techniques, écologiques et psychologiques

Dans l'élaboration de leur questionnaire sur la présence, Witmer et Singer [40] ont proposé quatre grandes catégories de facteurs, à savoir les facteurs de contrôle, les facteurs sensoriels, les facteurs de distraction et les facteurs de réalisme de telle sorte que :

- Les facteurs de contrôle comprennent la prévisibilité, l'interactivité et le contrôle sur l'environnement, qui peuvent se résumer au facteur d'**interaction du système**.
- Les facteurs sensoriels comprennent la richesse de l'environnement, le nombre et la fidélité des stimuli sensorielles et leur cohérence, qui peuvent se résumer au facteur d'**immersion du système**.
- Les facteurs de distraction comprennent l'isolement du monde réel et la conscience de l'interface et font également référence à l'**immersion du système**.
- Les facteurs de réalisme font référence à la mesure dans laquelle l'expérience est significative et cohérente avec les attentes du monde réel et qui peuvent donc se résumer à la **cohérence de l'environnement**.

Les auteurs affirment que plus ces facteurs peuvent influencer la présence en agissant sur l'engagement ou l'implication de l'utilisateur. On peut donc reformuler la conception de Witmer et Singer de la présence en facteurs techniques, écologiques et psychologiques.

IJsselsteijn et al. [194] quant à eux, ont passé en revue la littérature existante afin de résumer les recherches sur les facteurs contribuant à la présence spatiale. Les auteurs ont ainsi identifié quatre déterminants clés de la présence : (1) l'étendue et la fidélité des informations sensorielles, (2) la correspondance entre les capteurs et l'affichage - ces deux facteurs faisant référence au degré d'**immersion du système** -, (3) les facteurs liés au **contenu de l'environnement** en particulier la cohérence du scénario et (4) les **caractéristiques psychologiques** de l'utilisateur.

Plus récemment, Skarbez et al. [36] ont proposé l'immersion et l'interaction du système, la cohérence du scénario mais aussi la présence sociale qu'ils ont défini comme la mesure dans laquelle l'expérience offre de la compagnie à l'utilisateur, comme facteurs principaux de la présence. En plus de ces composantes principales, ils ont ajouté à leur modèle un sous-ensemble de facteurs incluant le degré d'attention allouée et les différences individuelles des utilisateurs.

Sas : Équation de la présence spatiale (2003)

Dans l'objectif de mettre des « poids » sur les facteurs de la présence spatiale, Sas et O'Hare [43] ont proposé une équation de présence comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Présence} = & a \times (\text{Facteurs cognitifs}) + b \times (\text{Facteurs spécifiques à la tâche}) \\ & + c \times (\text{Facteurs techniques}) + d \times (\text{Contenu médiatique}). \end{aligned}$$

A noter que les facteurs cognitifs dépendent des caractéristiques psychologiques des participants et que le contenu des médias fait référence à l'environnement et donc aux facteurs écologiques. Plus précisément, l'équation de présence met en évidence les différences individuelles des utilisateurs, la nature de la tâche, l'immersion du sys-

tème et la cohérence du contenu, ainsi que leurs coefficients respectifs. En outre, la discussion de Sas et O'Hare concernant l'impact de l'immersion semble indiquer qu'ils pensent que $c > a, b$. Pour finir, la tentative des auteurs de fournir une équation montre qu'il est important non seulement de trouver les facteurs de la présence mais aussi de leur **attribuer un poids en fonction de leur degré d'influence** dans le but de prédire la variabilité d'émergence de la présence spatiale.

Pour résumer, la plupart des chercheurs proposent aujourd'hui une combinaison des trois approches techniques, écologique et cognitive/psychologique pour déterminer les facteurs qui influencent la formation de la présence spatiale [48]. Au moment où cette thèse est rédigée, des modèles conceptuels continuent d'être proposés ce qui montre que la recherche pour conceptualiser la présence spatiale est encore active.

Cependant, ces modèles souffrent d'une opérationnalisation non systématique du concept, en partie car ils ne prennent pas en compte tous les facteurs de la présence spatiale et leurs interactions. De plus, il existe des incohérences entre les conceptualisations principalement en raison du manque de clarté des définitions de la présence spatiale et de ses facteurs [56].

Pourtant, un modèle standardisé de la présence spatiale pourrait jouer un rôle majeur dans la réussite de la communication entre les chercheurs et permettre une meilleure comparaison du phénomène entre les études. Par conséquent, dans cette thèse, nous proposons un modèle conceptuel multidimensionnel et multifactoriel de la présence spatiale qui a pour vocation d'unifier les efforts existants et de développer une théorie cohérente. Une première version de ce modèle est présentée dans la section suivante.

2.4 Notre modèle de la présence spatiale

La figure 2.7 illustre le modèle que nous avons élaboré. Ce modèle doit être considéré comme une première tentative qui sera affiné/modifié durant toute la thèse jusqu'à atteindre un modèle le plus détaillé et le plus inclusif possible.

Ainsi, nous avons regroupé les facteurs contribuant à la formation de la présence spatiale en cinq catégories :

- Les facteurs liés à la **fidélité sensori-motrice du système**.
- Les facteurs liés aux **caractéristiques psychologiques des utilisateurs**.
- Les facteurs liés à la **validité écologique de l'environnement**.
- Les facteurs **négatifs**.
- Les facteurs liés aux **autres formes de présence**.

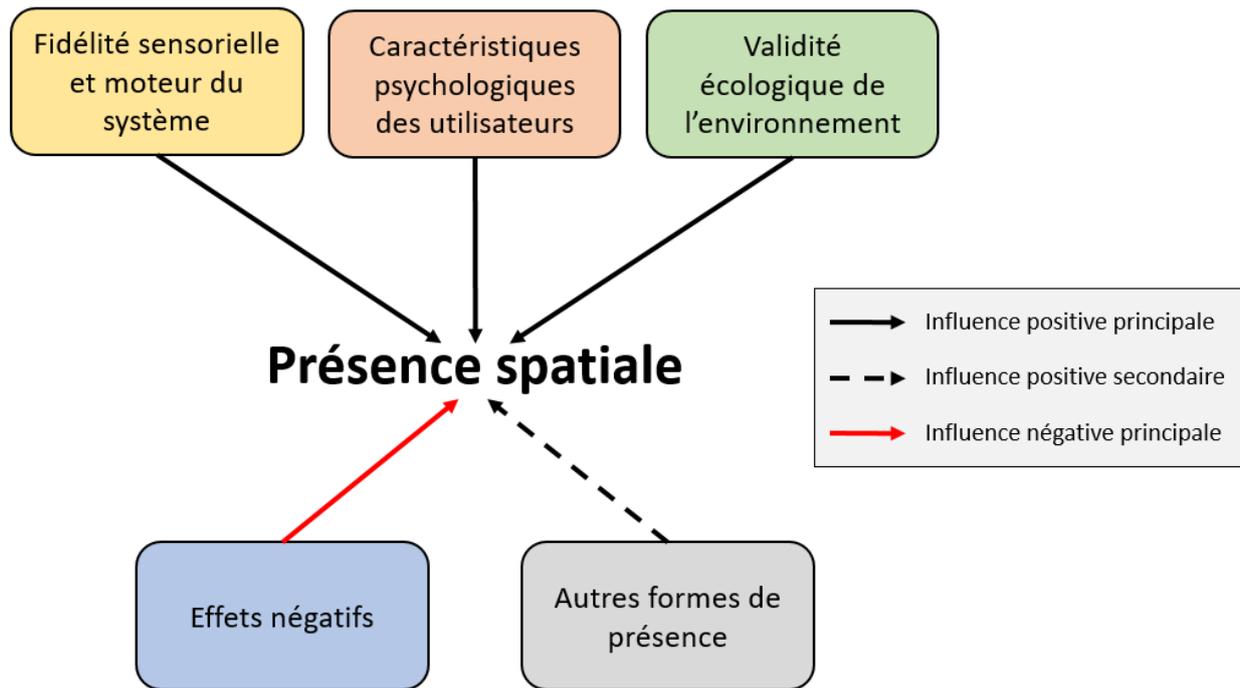


FIGURE 2.7 – Notre modèle de présence spatiale.

2.4.1 Fidélité sensori-motrice

La première composante du modèle représente les facteurs techniques du système qui contribuent à la fidélité sensori-motrice **sans laquelle nous soutenons que l'émergence de la présence ne peut survenir**. Nous définissons la fidélité comme « la mesure dans laquelle les informations sensori-motrices dans l'environnement médiatisé sont similaires à celles dans le monde réel ». Elle comprend deux facteurs principaux : l'immersion et l'interaction (voir figure 2.8).

Immersion

L'immersion représente le nombre de stimuli sensoriels, leur qualité et la cohérence entre chaque stimulus.

Interaction

L'interaction représente le degré de contrôle et de modification du système ainsi que sa réactivité (latence).

2.4.2 Caractéristiques psychologiques

Même si, en tant que développeurs d'environnements médiatisés, nous avons peu de contrôle sur ce type de facteurs, il est important de prendre en considération - au moins implicitement - l'impact des caractéristiques psychologiques et individuelles des utilisateurs sur la présence. Le facteur le plus influent est l'implication de l'utilisateur (voir figure 2.9).

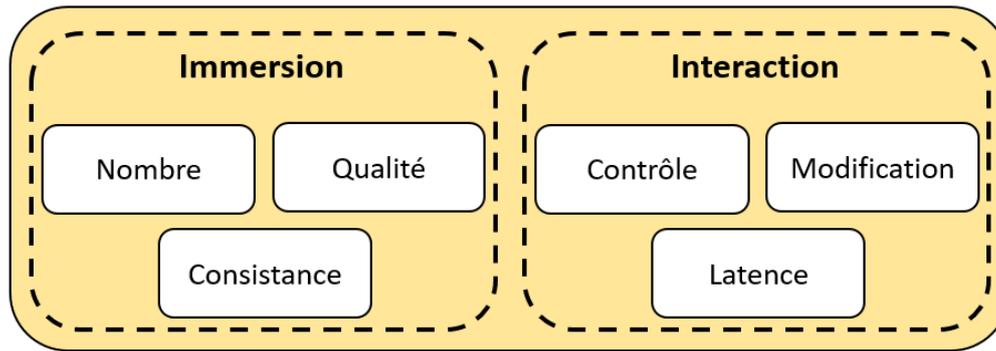


FIGURE 2.8 – Facteurs liés à la fidélité sensori-motrice du système.

Implication

L'implication dépend du niveau d'attention/concentration que l'utilisateur alloue à l'environnement mais surtout de sa volonté de suspendre son incrédulité de se trouver dans un environnement différent de celui où son corps se trouve physiquement. Ainsi, les efforts mentaux actifs et conscients pour suspendre sa propre incrédulité quant à l'authenticité des stimuli entrants sont la condition préalable majeure pour que la présence spatiale émerge [159, 56, 180, 30].

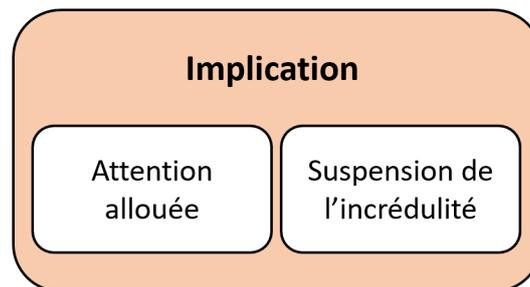


FIGURE 2.9 – Facteurs liés aux différences individuelles.

2.4.3 Validité écologique

La troisième composante de notre modèle représente les facteurs qui influencent la perception de l'utilisateur de son environnement. Ils contribuent au niveau de réalité et de cohérence de l'environnement. Elle comprend des facteurs liés à l'affordance de l'environnement et à la tâche à accomplir (voir figure 2.10).

Affordance

L'affordance façonne la représentation mentale de l'utilisateur des actions qu'il peut possiblement entreprendre dans l'environnement. Plus exactement, elle dépend du lien entre la perception de l'utilisateur des actions possibles dans l'environnement et de la réactivité de l'environnement en adéquation avec les attentes de l'utilisateur.

Tâche

La nature de la tâche de même qu'une meilleure performance peut affecter le niveau d'implication de l'utilisateur dans l'environnement et engendrer ainsi une sensation de présence spatiale plus élevée.

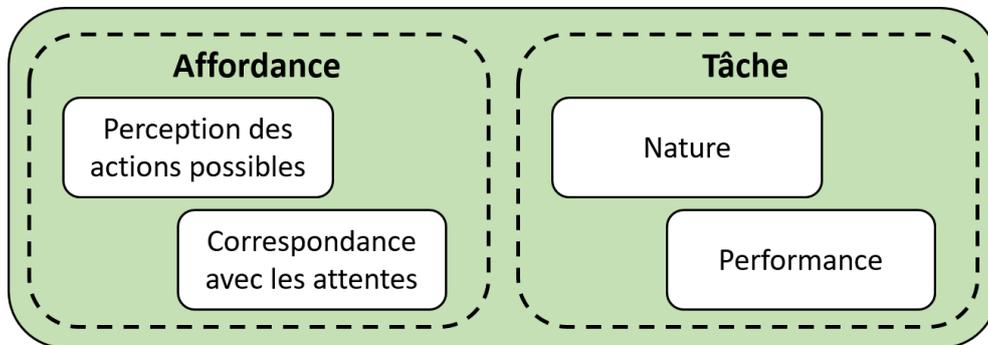


FIGURE 2.10 – Facteurs liés à la validité écologique de l'environnement.

2.4.4 Facteurs négatifs

Nous avons choisi de considérer les effets négatifs, en particulier la sensation de mal des simulateurs, comme une composante indépendante du modèle pour mettre en évidence son impact qui peut être **considérable** sur la formation de la présence spatiale (voir figure 2.11). En effet, la sensation de mal des simulateurs fait l'objet de nombreuses recherches [195, 165] ; en cause, son influence sur l'expérience des utilisateurs.

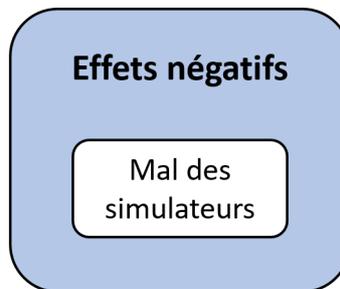


FIGURE 2.11 – Facteurs négatifs.

2.4.5 Autres formes de présence

La dernière composante de notre modèle se réfère au cas spécifique où un utilisateur fait l'expérience d'autres formes de présence principalement la présence de soi et la présence sociale.

Comme décrit dans la section 1.4 du chapitre précédent, ces deux formes de présence sont activées lorsqu'il y a **incarnation** (voir figure 2.12) : soit de l'utilisateur dans son corps, soit d'autres entités humaines ou virtuelles dans l'environnement. L'incarnation est d'autant plus influente lors de l'utilisation d'avatars pour représenter à la fois le

corps de l'utilisateur ou certaines de ses parties ainsi que les autres entités de l'environnement.



FIGURE 2.12 – Facteurs liés aux autres formes de présence.

2.4.6 Interactions des facteurs

Comme dit plus haut, certains facteurs peuvent exercer une influence sur d'autres facteurs. Par exemple, la latence du système peut causer une sensation de mal des simulateurs. A son tour, la sensation de mal-être peut restreindre l'implication de l'utilisateur dans l'environnement et réduire sa performance, tout comme peut le faire une mauvaise adéquation/correspondance entre les réactions de l'environnement et les attentes des utilisateurs. Il est à noter également que certains facteurs peuvent venir se superposer partiellement sur d'autres facteurs. C'est notamment le cas de l'affordance dans l'environnement qui est lié à la capacité du système de produire un niveau d'interaction satisfaisant.

D'autres interactions existent et c'est l'un des objectifs de cette thèse que de les mettre systématiquement en lumière. Les interactions existantes seront ainsi explicitées de manière approfondie dans le chapitre 6.

2.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les approches principales pour déterminer les facteurs de la présence spatiale, à savoir l'approche **technique** qui met l'accent sur le niveau d'immersion et d'interaction du système, l'approche **rationnelle** qui souligne la relation entre la performance de l'utilisateur et son degré de présence, l'approche **écologique** qui met en avant l'affordance de l'environnement ainsi que son degré de réalité et son niveau de cohérence et l'approche **psychologique** qui place les caractéristiques psychologiques de l'utilisateur au centre du processus d'émergence de la présence spatiale.

Nous avons ensuite décrit les modèles conceptuels de la présence au travers de trois catégories : les modèles **centrés autour des capacités techniques des systèmes**, les modèles **décrivant les différentes phases de construction cognitives** impliquées dans la formation de la présence et les modèles **multifactoriels** s'inspirant des différentes approches décrites plus haut pour proposer un ensemble de facteurs de la présence.

Le nombre et la diversité des modèles décrits dans ce chapitre a montré combien il est difficile de définir un modèle clair et universel de la présence spatiale. Par ailleurs, nous avons constaté que des incohérences subsistaient d'un modèle à l'autre (en partie en raison d'une confusion sur la définition du concept) mais surtout, qu'aucun ne prenait en compte tous les facteurs qui contribuent à la formation de la présence spatiale. Dans une tentative d'unifier les théories autour du concept de la présence spatiale, nous avons alors proposé un premier modèle multifactoriel en prenant en compte les différentes approches et les modèles existants. Ce modèle sera affiné en se basant sur les résultats de différentes études menées au cours de cette thèse et qui seront décrites dans les prochains chapitres.

L'objectif final de cette thèse est de proposer un modèle qui soit **applicable à différents systèmes et environnements** et qui puisse servir de base dans la comparaison des propositions théoriques et des résultats empiriques au sein et entre les disciplines autour du concept de la présence spatiale.

English Summary

In this chapter, the main approaches to determine the factors of spatial presence are presented as follows :

1. **The technical approach**, which focuses on the level of immersion and interaction that a system must provide to induce a sense of spatial presence.
2. **The rational approach**, which highlights the relationship between the user's performance and his/her sense of presence.
3. **The ecological approach**, which emphasizes the affordance of the environment and its degree of coherence and reality.
4. **The psychological approach**, which places the user's psychological characteristics at the center of the process of the emergence of spatial presence.

Based on these approaches, many researchers from various fields have developed different conceptual models of spatial presence. However, the confusion that ranks over the concept of presence has led to inconsistent and incomplete models with different objectives. These models can be divided into three categories :

tegories :

1. **The technology-oriented models** centered on the technical capabilities of systems such as the Spatial Sensory Fidelity model [167].
2. **The cognitive-oriented models** describing the construction phases involved in the mental formation of presence such as the Embodied Presence model [33].
3. **The multifactorial models** that rely on the different approaches listed above to propose a set of factors influencing spatial presence such as the Spatial Presence Equation [43].

Yet, although many models exist, none of them took into account all the factors that contribute to the formation of spatial presence. Therefore, in an attempt to unify the theories around the concept of spatial presence, **a multifactorial model is proposed** in this chapter, taking into account the different approaches to determine the most important factors. This model will be refined based on the results of the different studies conducted during this thesis that will be described in the next chapters of the manuscript.

———— CHAPITRE 3 ————

TÉLÉPRÉSENCE ET MULTISENSORIALITÉ :
ÉTUDE EXPLORATOIRE

3.1 Introduction et motivation

Comme dit dans le précédent chapitre, la Présence Spatiale peut émerger indépendamment de l'environnement dans lequel un utilisateur est « transporté » qu'il soit réel, virtuel ou distant. Selon l'environnement, l'utilisateur expérimente alors une présence spatiale dite naturelle, virtuelle ou distante. Dans ce dernier cas, on dit que l'utilisateur est « téléprésent ».

Dans cette quête vers la compréhension de la présence spatiale, un grand nombre de chercheurs se sont concentrés sur l'évaluation de la présence virtuelle en la comparant à la présence naturelle. Cette dernière représente par définition une base de référence, c'est-à-dire que la présence « doit » y être logiquement la plus élevée. Par exemple, Usoh et al. [98] ont mené une expérience dans laquelle 10 participants devaient trouver une boîte. Ces derniers étaient placés soit dans un bureau réel, soit dans un environnement virtuel qui simulait le même bureau et qui était restitué dans un visiocasque de réalité virtuelle (en anglais, « head-mounted display » ou HMD). Après l'expérience, la présence spatiale a été évaluée en utilisant l'ITC-SOPI [34]. Ce dernier a révélé un degré de présence significativement plus élevé lorsque les utilisateurs étaient dans l'environnement réel. De même, Mania [149] a utilisé le questionnaire de présence développé par Slater et al. [100] pour évaluer le niveau de présence dans une tâche de mémoire. Il a comparé une salle de séminaire réelle avec un environnement virtuel simulant la même salle dans un visiocasque. Les résultats ont montré une sensation de présence plus élevée dans l'environnement réel. Plus récemment, Busch et al. [48] ont examiné l'utilisation d'une application de navigation mobile en comparant la sensation de présence dans un laboratoire réel avec une simulation virtuelle de ce même laboratoire restituée dans un système de type CAVE à cinq côtés [196]. Pour ce faire, 65 participants ont testé l'application dans une des deux conditions puis ont reporté leur degré de présence à l'aide de l'ITC-SOPI. Les résultats n'ont montré aucune différence significative de la sensation de présence spatiale entre les deux environnements. Suivant la même procédure, Brade et al. [148] ont comparé un centre ville réel et une simulation virtuelle du même endroit restituée dans un CAVE. Une fois encore, les résultats obtenus de 60 participants n'ont montré aucune différence de la présence spatiale.

Le premier constat qui ressort de ces études est que **la présence naturelle n'est pas automatiquement jaugée comme plus élevée que la présence virtuelle**. On peut alors se poser la question de la fiabilité des questionnaires en tant que seules mesures pour évaluer la présence.

Si divers études comparatives ont été menées en environnements virtuels, c'est en revanche loin d'être le cas en ce qui concerne **les environnements distants pour lesquels l'évaluation de la présence spatiale souffre d'un manque relatif d'intérêt**. Ainsi, à notre connaissance, avant cette thèse, aucune étude visant spécifiquement à examiner la sensation de téléprésence n'a été menée. L'absence de ce type de travaux peut s'expliquer en partie par le traitement des environnements virtuels et distants comme étant un seul type d'environnements, à savoir des

environnements dits « médiatisés », ce qui a laissé implicitement supposer que l'étude de la présence en environnements virtuels conduisaient à des résultats similaires à ceux en environnements distants. **Or, cette hypothèse n'a jamais été testée.** Il est vrai que le rendu des deux types d'environnements repose sur une interface utilisateur similaire. En outre, ils ont pour caractéristique commune que l'expérience de l'utilisateur sera transmise via une représentation digitale à un certain stade du processus, c'est-à-dire à l'aide de technologies de Réalité Virtuelle (RV) et de téléopération (visiocasque, CAVE, bras robotique téléopéré, etc.). Toutefois, une différence majeure entre les deux situations est que **la représentation physique de l'espace existe dans le cas des environnements distants.** Cela signifie que les actions en environnements distants ont la possibilité d'induire des conséquences réelles dans l'espace physiques associé (ex. des objets qui se cassent), contrairement aux environnements purement virtuels où le résultat de toute action reste limité à l'espace généré par ordinateur [56]. La connaissance éventuelle des utilisateurs de l'existence de l'espace physique distant et surtout **la conscience de l'impact que leur actions** peuvent avoir sont donc grandement susceptibles d'influencer leur perception de l'environnement qui les entoure et en conséquence, leur perception de leur présence spatiale [197].

Avant d'aller plus loin dans cette réflexion et afin d'éviter toute ambiguïté entre environnements virtuels et environnements distants, nous allons préciser les critères qu'un environnement doit respecter pour être considéré comme distant.

Critères des environnements distants

En se basant sur la réflexion faite plus haut, un environnement est considéré comme distant dès qu'il répond à deux critères :

Critère 1 : Il permet la perception à distance d'un **espace réel**, soit par :

- a. La médiation de la stimulation sensori-motrice** de l'espace en fonction de sa nature et de l'activité en son sein et lorsque les technologies le permettent. Par exemple, la manipulation d'objets avec des gants haptiques [198].
- b. La représentation virtuelle** de l'espace qui peut être très réaliste (reconstruction 3D de la scène et/ou modélisation physique de propriétés réelles) ou simplement symbolique selon l'objectif visé (apprentissage, optimisation des performances, divertissement [199], etc.).
- c. La combinaison de (1.a) et (1.b).** Ce cas est plus fréquent dans les environnements de Réalité Augmentée (RA) lorsque l'objectif est de fournir une assistance à distance (par exemple, lors d'opérations chirurgicales [200]) ou lorsqu'il n'y a pas de circulation de données en temps réel possible (par exemple, lors d'opérations spatiales [201]) ou encore lorsque la nature de l'espace le rend difficile à percevoir (par exemple, lors d'opérations sous-marines et souterraines dans des véhicules télécommandés [202]).

Critère 2 : Les actions des utilisateurs doivent avoir des **conséquences physiquement effectives** dans l'espace réel (avec une immédiateté variable selon les contraintes des systèmes de RV ou de téléopération). En outre, les utilisateurs doivent **être conscients** de cet impact.

Si le premier critère est généralement respecté, le second est souvent négligé, créant une confusion entre les environnements distants et virtuels. Par exemple, dans l'étude de McCall et al. [203] sur la présence, les participants étaient soit physiquement situés dans un jardin réel, soit dans un environnement généré par ordinateur représentant le même jardin (restitué dans un visiocasque). L'environnement était généré par le rendu d'images photographiques du jardin réel (critère 1.b rempli). Cependant, les participants n'avaient aucun impact sur le vrai jardin car les images capturées l'avaient été avant l'expérience (critère 2 non satisfait). Par conséquent, l'environnement photo-réaliste en question était un environnement virtuel et non distant.

Une autre raison pouvant expliquer le manque d'études sur la téléprésence spatiale est le faible niveau de fidélité sensorielle que la technologie pouvait fournir, il y a encore quelques années. Plus généralement appelée **immersion** [187], elle est déterminée par la qualité, la richesse et la cohérence de chaque canal sensoriel utilisé par le système [33]. Sa relation avec la présence spatiale a fait l'objet de nombreuses discussions théoriques et d'études empiriques depuis plus de 30 ans.

Il est ainsi communément admis que l'immersion joue un rôle significatif dans l'émergence de la présence spatiale par la construction d'une représentation mentale de l'environnement dans lequel se trouvent les utilisateurs [204, 12]. En d'autres termes, indépendamment du type de l'environnement, **les systèmes présentant une immersion de qualité supérieure suscitent une plus grande sensation de présence spatiale**. Cependant, l'impact de l'immersion est d'autant plus crucial lorsqu'il s'agit d'évaluer la téléprésence. Cela s'explique par la nécessité de fournir des canaux sensoriels de haute qualité pour permettre aux utilisateurs dans l'environnement distant de vivre une situation immersive similaire à celle d'un environnement réel (non distant) [15].

Grâce aux récentes avancées technologiques, notamment sur la qualité visuelle des visiocasques, la spatia-lisation du son et la réduction de la latence des systèmes, on peut maintenant développer des environnements distants qui présentent un haut degré d'immersion. Ces derniers permettant d'offrir une perception sensorielle élevée du monde réel, il devient donc très intéressant de mener des études sur la présence spatiale à distance dans ce type d'environnement. A noter que dans cette thèse, nous nous concentrons plus particulièrement sur la fidélité des canaux sensoriels **visuels et auditifs**. En ce qui concerne le canal haptique, il nécessite la mise en place d'effecteurs robotiques. A ce jour, ceci est technologiquement possible en temps-réel dans un certain nombre de cas, notamment quand la communication avec le monde distant est fiable, grâce à des boucles de simulations et d'action distinctes et synchronisées [200, 202]. Cependant, le déploiement d'une telle technologie reste très délicat et beaucoup plus onéreux que pour les canaux sensoriels visuels et auditifs.

Quoi qu'il en soit, la comparaison entre environnements réels (i.e., environnement perçu directement sans au-

cune médiation technologique) et distants rendus les plus fidèles possibles via l'utilisation de technologies sensorielles modernes de RV permettrait d'isoler l'effet de ces technologies sur le processus d'émergence de la présence spatiale. En d'autres termes, cela permettrait d'évaluer véritablement la relation entre l'immersion et la présence spatiale.

Cette réflexion autour des avancées technologiques en RV et du manque de travaux menés sur la téléprésence spatiale nous a poussé à mettre en place une première étude exploratoire visant à évaluer la téléprésence ainsi que sa relation avec la fidélité sensorielle.

Objectifs et plan du chapitre

L'étude exploratoire présentée dans ce chapitre avait deux objectifs principaux. Le premier était d'évaluer le degré de présence spatiale engendrée en environnement distant (en respectant les critères (1.a) et (2)) et de le comparer au degré de présence spatiale « in-vivo ». Le second objectif était d'examiner l'effet de la multisensorialité sur la présence spatiale tout comme sur certains de ses facteurs.

Pour ce faire, nous avons mené une expérimentation qui consistait à comparer deux environnements, l'un dit « réel » (i.e. perçu directement) et l'autre distant (i.e. espace réel médiatisé). Les deux environnements se devaient d'être restitués dans des conditions immersives (visuelles et auditives) les plus similaires possible. Afin de mesurer la présence spatiale, nous avons combiné l'utilisation d'un questionnaire avec l'analyse de la performance et du comportement des participants de l'étude en nous basant sur les méthodes d'évaluation qui existent dans la littérature (section 1.5 du chapitre 1). De plus, le niveau de corrélation de ces mesures a été évalué [132].

Les participants devaient effectuer une tâche de pointage en 3D dans l'un des deux environnements, chacun ayant un degré de fidélité sensorielle variable. Le choix de la tâche a été guidé d'une part, par la nécessité de permettre aux participants de **percevoir l'impact de leurs actions sur l'espace réel** et d'autre part, par notre volonté de **solliciter l'appareil moteur des participants** afin de les impliquer d'avantage dans la tâche (l'implication permettant d'augmenter le niveau de présence spatiale [157, 156]).

La suite de ce chapitre est divisée en cinq parties. La première donne un aperçu des travaux existants en terme d'évaluation de la présence spatiale dans différents environnements et l'impact de la multisensorialité. La deuxième partie décrit la mise en place de l'expérimentation, le protocole d'évaluation et les hypothèses. La troisième présente l'analyse des données récoltées et les résultats obtenus. La quatrième partie est consacrée à l'interprétation de ces résultats. La dernière partie du chapitre conclut par la mise en lumière de nouvelles perspectives pour la suite de la thèse et par la description d'un ensemble d'améliorations à apporter à notre modèle de présence spatiale.

3.2 Analyse des travaux existants

3.2.1 Évaluation de la présence spatiale

Depuis son apparition dans la sphère de la robotique, de nombreuses études sur la téléprésence ont mis en évidence son rôle dans la transmission d'informations, notamment en ce qui concerne la perception spatiale d'un espace distant [76]. Dès lors, la téléprésence a été d'une importance particulière pour les chercheurs désireux d'améliorer les performances des utilisateurs lors de tâches de manipulation à distance. En outre, ces études ont également souligné l'importance de fournir aux utilisateurs des repères spatiaux pour améliorer leur sensation de téléprésence [77]. C'est donc tout naturellement que la recherche sur la présence spatiale en environnements distants s'est concentrée sur l'optimisation des caractéristiques technologiques des systèmes de téléopération dans l'optique d'améliorer à la fois le degré de téléprésence et les performances des utilisateurs [205]. De tels systèmes ont notamment été développés dans le domaine de la robotique (ex. opérations spatiales [201]) mais aussi dans le milieu médical (ex. applications chirurgicales [79]) et le milieu industriel (ex. opérations d'assemblage [206]).

Même si ces travaux ont permis d'améliorer les systèmes de téléopération, cette vision très techno-centrée a peu contribué à la compréhension de la téléprésence en tant que phénomène psycho-cognitif tout comme elle n'a pas aidé à la mise en lumière des différents facteurs qui influencent l'émergence du phénomène et des moyens de le mesurer.

Ce type d'études a plutôt été le lot des chercheurs en RV qui se sont attelés à développer des environnements virtuels engendrant toujours plus de présence spatiale. Les raisons derrière cette démarche sont fortement liées à l'utilité de la présence spatiale dans les applications de RV. Par exemple, la présence spatiale peut faciliter le transfert des informations nécessaires à la bonne conduite d'opérations chirurgicales [207] ou le transfert de l'apprentissage lors d'enseignement [80]. Elle permet également d'intensifier les effets positifs des applications et leur impact sur les réactions émotionnelles des utilisateurs tels que le plaisir et la satisfaction dans les jeux virtuels [81] ou la peur et l'anxiété dans les thérapies virtuelles [82].

Ainsi, dans le but d'améliorer l'efficacité de leurs applications, les chercheurs en RV ont étudié ce phénomène de manière intensive. De nombreuses études en RV se sont attachées à identifier les facteurs influençant la présence spatiale mais aussi à élaborer des outils permettant d'évaluer cette dernière [5, 148, 48, 149, 126]. Par conséquent, les études décrites dans la littérature sont dans leur majorité liées au contexte virtuel. C'est donc de ces études en RV dont nous nous sommes inspirés pour mettre en place notre évaluation de la présence spatiale en environnement distant.

3.2.2 Évaluation de la multisensorialité

Un autre aspect particulièrement pertinent de la recherche sur la présence spatiale est l'évaluation des effets potentiels de la stimulation multisensorielle, plus précisément la stimulation visuelle et auditive. Plusieurs chercheurs ont abordé ce sujet. Par exemple, Mania et Chalmers [108] ont comparé la sensation de présence - à l'aide du questionnaire de Slater et al. [100] - entre un environnement réel, un environnement virtuel audiovisuel et un environnement virtuel uniquement sonore. Les résultats de l'évaluation ont indiqué un effet positif de la multisensorialité sur la présence spatiale. En particulier, les 18 participants de l'étude ont rapporté des niveaux de présence plus élevés de l'environnement réel par rapports aux deux environnements virtuels, ainsi qu'un niveau de présence plus élevé dans l'environnement audiovisuel par rapport à l'environnement proposant uniquement un canal auditif.

Larsson et al. [208] ont conduit une expérience dans laquelle 30 participants étaient exposés à quatre conditions audiovisuelles différentes avec des degrés variables de cohérence auditive-visuelle (une purement visuelle et trois autres audiovisuelles). Ils ont émis l'hypothèse que la cohérence des rendus sensoriels visuel et auditif était cruciale dans le processus d'émergence de la présence spatiale. A la fin de l'expérience, les participants ont reporté leur niveau de présence dans un questionnaire. Leurs réponses ont montré que les conditions audiovisuelles induisaient une présence significativement plus élevée que la condition présentant seulement des informations visuelles. Cependant, aucune différence significative entre les trois conditions audiovisuelles n'a été trouvée malgré les niveaux différents de cohérence entre les canaux visuel et auditif.

De même, Cooper et al. [3] ont examiné l'effet des différents canaux auditif, visuel mais aussi tactile sur la formation de la présence spatiale (évaluée à l'aide d'un questionnaire). Les auteurs ont mené une étude où 17 participants devaient effectuer un changement de roue dans un environnement virtuel. Des indices auditifs, haptiques et visuels, signalant des événements critiques étaient manipulées durant l'exécution de la tâche. Les résultats ont montré un effet significatif des canaux audio et tactile sur la sensation de présence spatiale mais pas du canal visuel.

Pour résumer, l'effet positif de la stimulation multisensorielle sur la formation de la présence spatiale a été démontré en milieu virtuel. Logiquement, la présente étude vise à examiner dans quelle mesure ces résultats sont généralisables dans le contexte d'un espace distant et si l'effet de cette stimulation est différent selon que l'environnement est réel ou distant.

3.3 Conception, mise en place et déroulement de l'expérimentation

Cette section décrit dans sa globalité le processus qui a permis de mener l'étude. Cette dernière cherche à évaluer la sensation de présence spatiale dans deux environnements réel et distant ainsi que l'impact de la multisensorialité dans le but d'approfondir nos connaissances sur la formation de la téléprésence.

3.3.1 Conception de l'expérimentation

Les environnements réel et distant

Le but principal de l'étude étant de comparer un environnement réel avec son homologue distant, il a d'abord fallu concevoir ces environnements. Pour ce faire, nous avons utilisé deux salles voisines de notre laboratoire comme le montre la figure 3.1 :

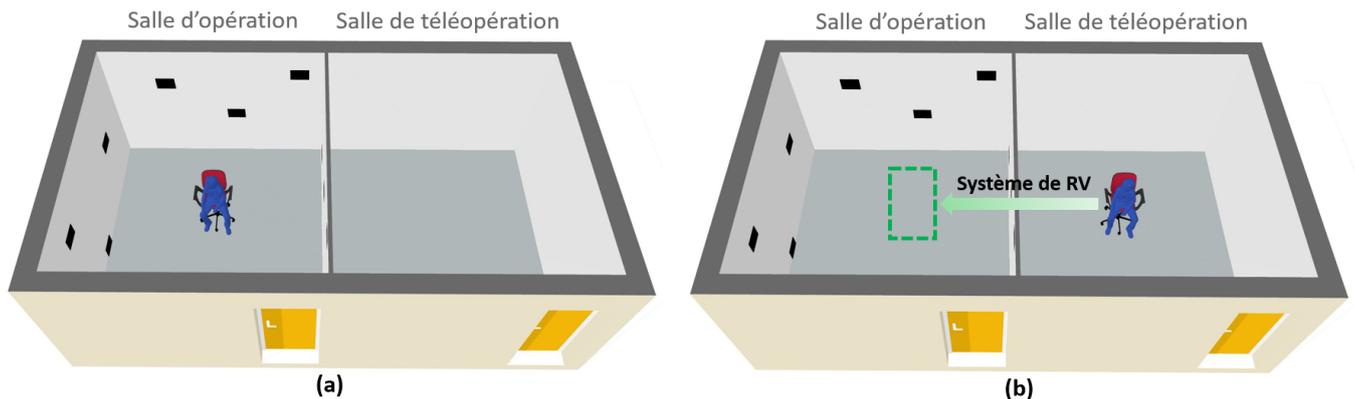


FIGURE 3.1 – Vue d'ensemble en 3D des deux salles. (a) Cas « réel » : un participant se trouve dans la salle d'opération. (b) Cas « distant » : un participant se trouve dans la salle de téléopération et est « transporté » dans la salle d'opération via un système de RV. Les rectangles noirs dans la salle d'opération représentent les émetteurs de stimuli visuels et auditifs (tablettes fixées au murs).

1. La première salle, nommée **salle d'opération**, est l'environnement dans lequel les participants de l'étude se trouvaient « physiquement » présent dans le cas d'une interaction non-médiée. D'une dimension de 4.25 m x 3.85 m, elle représentait une salle de bureau vide rectangulaire où nous avons attaché 12 tablettes à des positions fixes durant toute l'expérimentation (figure 3.2). Ces positions ont été déterminées au préalable à l'aide d'une procédure d'échantillonnage uniforme.
2. La deuxième salle, nommée **salle de téléopération**, représentait une pièce où se trouvait un système de téléopération permettant le « transport à distance » des participants dans la salle d'opération. Cette configuration symbolise l'environnement distant.

La tâche de pointage

De l'établissement de la loi de Fitts [209] - mettant en évidence que le temps nécessaire pour atteindre une cible dépend de la distance et de la taille de cette cible -, en 2D [210] puis en 3D [211, 212], jusqu'à leurs utilisations dans l'évaluation des nouvelles technologies de AR [213] et de RV [214, 215], les tâches de pointage ont fait l'objet de nombreuses études démontrant leur efficacité pour analyser le comportement des utilisateurs ainsi que leurs performances [216].



FIGURE 3.2 – Vue 360° de la salle d'opération.

Partant de ce constat, nous avons choisi d'utiliser une tâche de pointage en 3D dans le cadre de notre étude. Ce choix fait également écho à notre volonté de permettre aux participants de percevoir l'impact réel de leurs actions sur les éléments de la salle d'opération mais aussi d'impliquer les participants autant que possible dans le but d'augmenter leur présence spatiale dans les deux environnements réel et distant [157, 156].

Plus précisément, la tâche consistait à pointer le plus rapidement possible une séquence d'images affichées les unes après les autres sur les différentes tablettes¹. Les images représentaient au hasard différents types d'animaux connus de tous : chat, chien, canard et cochon. De plus, des sons correspondants aux cris des animaux affichés étaient joués à partir des tablettes où l'image s'affichait.

Pour résumer, les participants devaient s'asseoir au milieu d'une des deux salles sur une chaise pivotante. Cette chaise leur permettait de pivoter facilement vers les différents murs de la salle d'opération à la recherche de la tablette sur laquelle une image de la séquence était affichée. Une fois la tablette trouvée, ils effectuaient alors la tâche de pointage :

- soit **directement** s'ils se trouvaient dans la salle d'opération ;
- soit **à distance** par le biais du système de RV s'ils se trouvaient dans la salle de téléopération.

3.3.2 Mise en place de l'expérimentation

Trois types d'équipements ont été mis en œuvre : le matériel relatif au dispositif de restitution visuel, celui relatif au dispositif de restitution audio et celui relatif au dispositif de suivi des mouvements des participants.

1. L'ordre de cette séquence a été déterminé préalablement à l'expérimentation de manière aléatoire et a été la même pour tous les participants.

Dispositif visuel

Dans la salle d'opération, les participants bénéficiaient d'une stimulation visuelle directe. En ce qui concerne le système de RV, la capture visuelle à distance a été obtenue à l'aide d'une caméra panoramique Ricoh Theta-V 360°² (figure 3.3) placée au centre de la salle d'opération. Les images capturées étaient diffusées en continu à une résolution de 3840 x 1920 pixels et à une fréquence de 30 images par seconde vers le moteur de rendu Unity 3D v2018.1.0³(voir annexe A pour un descriptif du moteur Unity). Au sein d'Unity 3D, les images étaient plaquées sur une grande texture sphérique visualisée dans un casque de RV que les participants devaient porter dans la salle de téléopération.

Concernant ce casque, notre choix s'est porté sur le HTC-Vive⁴ (figure 3.3) qui offre un taux de rafraîchissement de 90 Hz. Cependant, son champ de vision étant limité à environ 110°, nous avons dû créer des conditions visuelles similaires lorsque les participants se trouvaient dans la salle d'opération.

Pour ce faire, nous avons fabriqué un masque de RV en carton qui limite le champ de vision des participants à 110° (figure 3.4). Le processus technique de fabrication de ce masque est détaillé en annexe B. Grâce à ce masque, nous avons pu contrôler les effets potentiels d'un champ de vision variable. En particulier, le nombre de tablettes visibles à un moment donné durant l'expérience était le même, que les participants se trouvent physiquement dans la salle d'opération ou à distance via le système de RV. A noter que les participants sollicités après l'expérimentation n'ont pas signalé de problème ergonomique particulier.



FIGURE 3.3 – Équipements du dispositif visuel. Image de gauche : la caméra panoramique Ricoh Theta-V 360°. Image de droite : le casque de réalité virtuelle HTC-Vive porté par les participants dans la salle de téléopération.

2. <https://theta360.com/fr/>

3. <https://unity.com/>

4. <https://www.vive.com/fr/product/vive/>



FIGURE 3.4 – Masque en carton pour limiter le champ de vision des participants dans la salle d’opération.

Dispositif audio

Dans la salle d’opération, les participants bénéficiaient d’une stimulation sonore naturelle : lorsqu’une image s’affichait, la tablette correspondante émettait un son. Pour reproduire une stimulation auditive similaire dans la salle de téléopération, un microphone ambisonique de 1^{er} ordre (microphone Tétramique par CoreSound⁵, voir figure 3.5) placé au centre de la salle d’opération a été utilisé pour capter le son. Ce son était ensuite rendu selon le procédé binaural en temps réel dans un casque audio (Closed Sennheiser HD 280⁶) situé dans la salle de téléopération.

Afin de gérer l’ensemble du processus de traitement audio, nous avons conçu un programme dédié dans l’environnement Max/MSP⁷. En particulier, nous avons utilisé la bibliothèque SPAT [217] pour effectuer d’abord la conversion du format d’enregistrement Tetramic (format A) au format Ambix - plus largement utilisé dans la communauté de l’audio 3D - puis dans un second temps, le décodage du rendu ambisonique au rendu binaural en se basant sur l’approche du réseau de haut-parleurs virtuels proposée dans [218]. L’utilisation de la bibliothèque SPAT nous a également permis d’ajouter un délai de réverbération de 1.25 secondes pour simuler l’acoustique de la salle d’opération.

Dispositif de suivi du mouvement (tracking)

Dans le but de rendre possible l’interaction des participants avec l’environnement, notamment la recherche et le pointage des images mais aussi pour obtenir des mesures comportementales relatives à l’étude, un ensemble d’outils ont été mis en place pour suivre à la fois le mouvement de la tête des participants et celui de leur main, que ce soit dans la salle d’opération ou de téléopération.

5. <https://www.core-sound.com/TetraMic/1.php>

6. <https://fr-fr.sennheiser.com/hd-280-pro>

7. <https://cycling74.com/products/max/>



FIGURE 3.5 – Équipements du dispositif audio. Image de gauche : le microphone ambisonique Tetramic. Image de droite : le casque audio Closed Sennheiser HD 280.

Ainsi, dans la salle d'opération, un système de suivi infrarouge a été installé, composé d'un réseau de six caméras de suivi ARTTrack5⁸ (figure 3.6). Les participants portaient des marqueurs infrarouges sur le masque en carton et sur la main qui leur servait à pointer. Les mouvements étaient alors enregistrés à 60 Hz avec une précision millimétrique.

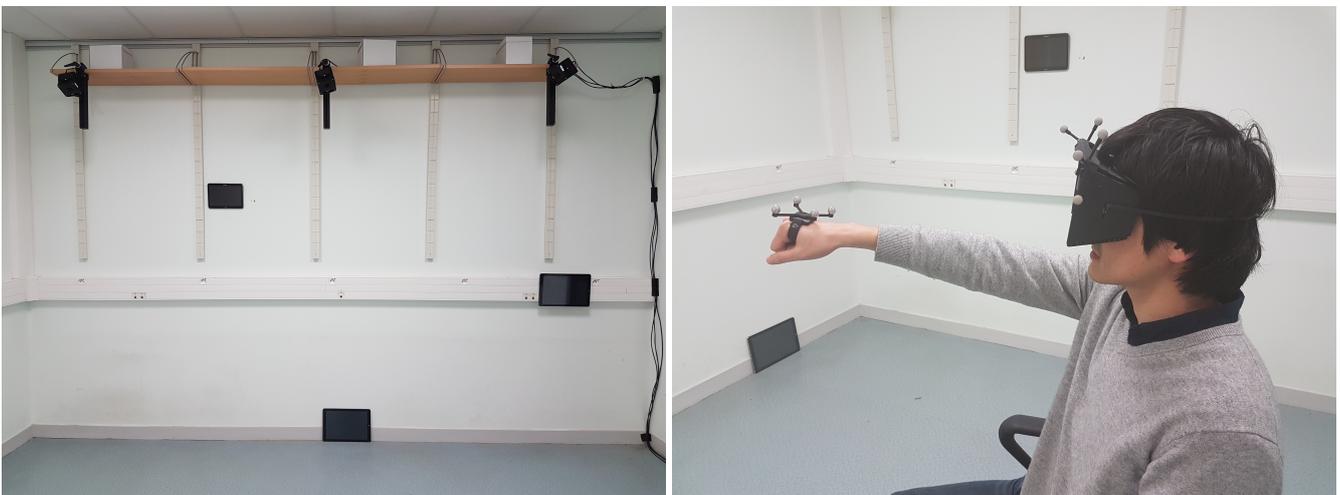


FIGURE 3.6 – Équipements du dispositif de suivi. Image de gauche : trois des six caméras de suivi installées dans la salle d'opération. Image de droite, un participant dans la salle d'opération portant les marqueurs infrarouges.

Dans la salle de téléopération, le suivi de la tête des participants a été obtenu grâce au système de suivi Lighthouse associé au HTC-Vive tandis que le suivi de la main a été assuré par l'installation d'un dispositif Leap Motion⁹ connecté à un ordinateur et fixé sur le casque de RV (figure 3.7). Le Leap Motion est un capteur qui permet de reconnaître de manière fiable les gestes des mains et de les transformer en actions précises. Nous l'avons donc

8. <https://ar-tracking.com/products/tracking-systems/arttrack5/>

9. <https://developer.leapmotion.com/>

utilisé pour suivre la position des mains des participants pendant le pointage des images. Les positions étaient enregistrées dans le système de coordonnées du visiocasque puis transformées en coordonnées du monde réel.

Dans un souci de réalisme, un avatar 3D de la main du participant était rendu pour simuler visuellement la main réelle telle qu'elle agissait dans la salle d'opération. Des entretiens recueillis auprès de 5 participants lors de tests pilotes ont montré que cette main virtuelle constituait un avatar fonctionnel de leur vraie main.



FIGURE 3.7 – Image de gauche : le Leap Motion fixé sur le casque HTC. Image de droite, un participant dans la salle de téléopération portant la combinaison HTC+Leap et le casque audio.

Algorithme de pointage : Afin de déterminer de manière exacte la direction de pointage durant l'expérimentation, un algorithme calculait un vecteur à partir de deux points virtuels : un premier situé juste devant les yeux des participants et un second point situé sur le dessus de leur main [219]¹⁰.

De plus, 12 sphères virtuelles invisibles ont été créées sous Unity 3D, chacune d'entre elles positionnées à l'emplacement d'une des 12 tablettes. L'algorithme considérait alors le pointage d'une image comme réussi dès lors qu'une intersection entre le vecteur de pointage et une sphère était détectée.

3.3.3 Design expérimental de l'expérimentation

De façon générale, le design expérimental dépend des deux éléments suivants :

- Le nombre de **variables indépendantes** (facteurs) manipulées durant l'expérimentation.
- Les **modalités** d'affectation des participants entre les différentes conditions expérimentales.

Pour les besoins de l'étude, nous avons défini deux variables indépendantes :

1. **La variable « environnement » [ENV].** Cette variable fait référence à l'environnement dans lequel les par-

10. Pour éviter toute mauvaise interprétation du geste de pointage et obtenir un vecteur de pointage le plus correct possible, les participants ont reçu pour instruction de fermer leur main lorsqu'ils visaient les images (pour ne pas utiliser leurs doigts pour pointer).

participants se situent. Elle se divise en deux conditions : *RÉEL* et *DISTANT*. La condition *RÉEL* correspond à la situation où un participant effectue la tâche en étant physiquement situé dans la salle d'opération (i.e. l'environnement réel). Quant à la condition *DISTANT*, elle représente la situation où un participant opère à distance à partir de la salle de téléopération (i.e. l'environnement distant). Cette variable a été définie comme « inter-sujets » afin de minimiser l'effet d'apprentissage de la tâche.

2. **La variable « sensorialité » [SEN].** Cette variable fait référence à l'utilisation des deux canaux sensoriels : visuel et audio. Elle se divise également en deux conditions intitulées *VISUEL+AUDIO* et *VISUEL* qui représentent respectivement une condition multisensorielle avec un rendu visuel et audio et une condition avec uniquement un rendu visuel. Elle a été définie comme « intra-sujets ».

L'expérimentation a ainsi été divisée en quatre conditions : {*RÉEL* ; *VISUEL+AUDIO*}, {*RÉEL* ; *VISUEL*}, {*DISTANT* ; *VISUEL+AUDIO*}, {*DISTANT* ; *VISUEL*}. Afin de contrôler l'effet d'ordre des conditions, nous les avons contrebalancées en suivant la méthode du « carré latin »¹¹.

3.3.4 Déroulement de l'expérimentation

Avant de lancer l'expérimentation, il a d'abord été nécessaire de faire approuver notre expérimentation par le comité d'éthique et de recherche de notre université¹². Des invitations à venir participer bénévolement à l'expérimentation ont ensuite été envoyées. Les personnes ayant accepté ont constitué notre échantillon expérimental.

Échantillon

Au total, 28 participants ont pris part à l'expérimentation (19 hommes, 9 femmes, $M_{age} = 27.4$ ans, $SD = 4.4$ ans, avec un âge compris entre 22 et 39 ans). Tous les participants avaient une vue normale ou corrigée à l'aide de lunettes et une audition non déficiente. Ils étaient tous issus du milieu universitaire : 18 participants étaient étudiants tandis que les 12 autres venaient de différents domaines scientifiques de l'université. En ce qui concerne leur niveau d'expérience en RV, seuls 4 participants n'avaient jamais utilisé de visiocasque auparavant et ont déclaré n'avoir aucune expérience des systèmes de RV, 17 ont déclaré se considérer comme débutants, 4 ont déclaré avoir une expertise intermédiaire et 5 se considéraient comme experts en RV.

Procédure

Les participants étaient accueillis sur le lieu de l'expérimentation par un évaluateur. Après signature d'un formulaire de consentement décrivant ce qui était attendu d'eux, l'expérimentation pouvait commencer. Comme mentionné dans la section 3.3.3, les participants exécutaient la tâche dans un seul des deux environnements (*RÉEL* ou

11. <https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/latin-square-design/>

12. <https://www.universite-paris-saclay.fr/recherche/polethis-ethique-et-integrite/comite-dethique-pour-la-recherche>

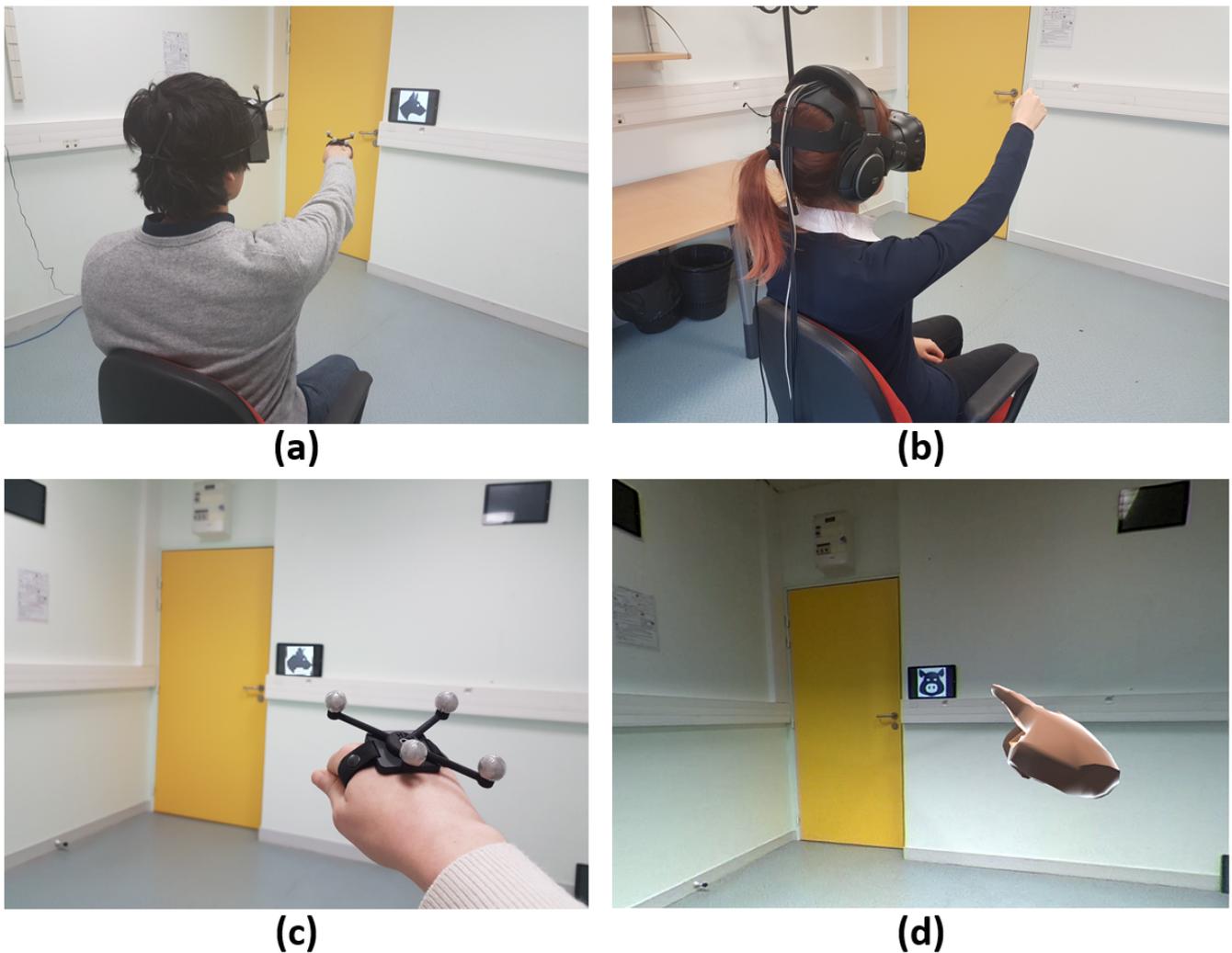


FIGURE 3.8 – (a, b) Participants durant l'expérimentation. (c, d) Leur point de vue à la première personne. (a, c) En condition *RÉEL*. (b, d) En condition *DISTANT*.

DISTANT) selon leur ordre d'affectation (la figure 3.8 illustre deux participants effectuant la tâche de pointage chacun dans l'un des deux environnements). Ils passaient alors successivement par les deux conditions sensorielles *VISUEL+AUDIO* et *VISUEL* ou vice versa. Par conséquent, chaque participant effectuait la tâche deux fois selon une procédure composée des trois parties suivantes :

- **L'entraînement.** Les participants commençaient par suivre une session d'entraînement pour se familiariser avec les appareils à utiliser, les instructions données par l'évaluateur, la tâche à accomplir et les contraintes associées (rester assis, fermer la main, utiliser la même main pour pointer tout au long de la passation).
- **La passation.** Les participants devaient trouver l'emplacement de l'image affichée et pointer dessus. Dès qu'une image était pointée, elle disparaissait et une autre apparaissait à un autre emplacement. Le but était de pointer sur un maximum d'images dans un délai de 3 minutes.
- **Le questionnaire.** Une fois la passation terminée, les participants devaient remplir un questionnaire de

présence. Notre choix pour cette évaluation s'est porté sur l'ITC-SOPI [34] pour sa facilité d'administration et de notation mais surtout car il permet d'analyser en plus de la présence spatiale, trois autres facteurs très intéressants à savoir l'engagement (l'implication), la validité écologique et les effets négatifs.

La durée de l'expérimentation (entraînement, passation et questionnaire) était d'environ 20 minutes. Comme les participants répétaient la tâche deux fois (une fois pour chaque condition sensorielle), la durée totale de l'expérience était de 40 minutes.

Collecte des données

Au total, 56 tests ont été enregistrés : 1 [ENV] x 2 [SEN] x 28 participants. Pour chaque test, le nombre total d'images pointées ainsi que les trajectoires de la tête et de la main des participants ont été enregistrés. De plus, les réponses de l'ITC-SOPI ainsi que des variables démographiques personnelles (âge, sexe, profession/éducation et expérience avec les systèmes de RV) ont été collectées. Par conséquent, l'étude comprenait sept mesures différentes regroupées comme suit :

Les mesures subjectives : Les réponses à l'ITC-SOPI basées sur une échelle de Likert à 5 points (sachant que 1 = « fortement en désaccord » et 5 = « fortement d'accord ») ont donné des scores pour chacun des quatre facteurs du questionnaire :

- **PS** : présence spatiale perçue.
- **ENG** : engagement dans la tâche.
- **ECO** : validité écologique de l'environnement.
- **NEG** : effets négatifs ressentis par le participant.

Les mesures objectives : Les mesures objectives ont été extraites du nombre d'images pointées et des trajectoires (représentées par des coordonnées X, Y, Z dans l'espace) comme suit :

- **SCORE** : performance du participant faisant référence au nombre total d'images qu'il a pointées lors de la passation.
- **HÉSITATION** : elle se rapporte au nombre de fois où le participant a pivoté sa tête dans une direction à la recherche d'une image puis a décidé de pivoter dans le sens opposé avant d'avoir trouvé l'image en question. Une valeur plus faible signifie que le participant a moins hésité pour localiser les images. Cette mesure est donc associée à un comportement du participant.
- **FLUIDITÉ** : fluidité de la courbe de trajectoire de la main. Elle indique dans quelle mesure le geste de pointage du participant était régulier. Comme pour l'HÉSITATION, cette mesure est de type comportementale.

Le SCORE a directement été enregistré durant la passation à partir des résultats des participants. En ce qui concerne la mesure d'HÉSITATION, elle a été extraite de la trajectoire de la tête des participants en comptabilisant - tant que l'image recherchée n'était pas localisée - le nombre de fois où la rotation de la tête dépassait un angle

supérieur à 90° dans une direction puis dans l'autre. Enfin, la FLUIDITÉ a été extraite en traitant le nuage de données de la trajectoire de la main des participants comme suit :

1. L'ensemble des coordonnées X , Y et Z dans l'espace a été projeté sur chaque mur de la salle d'opération pour obtenir des coordonnées X' et Y' sur un plan 2D (voir figure 3.9).
2. Une analyse en composantes principales (ACP) a alors été calculée pour obtenir la variance des composantes principales en abscisse et en ordonnée.
3. Enfin, le ratio entre ces variances a été calculé. Ce dernier représente l'indice de régularité de la courbe de trajectoire.

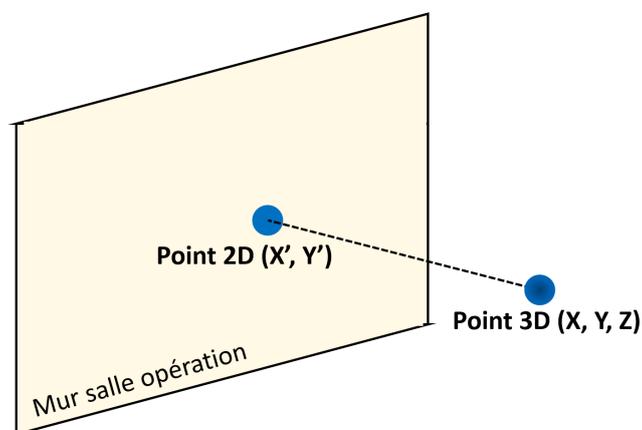


FIGURE 3.9 – Projection d'un point 3D sur l'un des murs de la salle d'opération.

Hypothèses

Nous envisageons que les participants ressentiraient **une présence spatiale plus élevée** dans l'environnement réel de même que pour ses trois facteurs associés : l'engagement, la validité écologique et les effets négatifs. Nous nous attendions également à ce que **les mesures objectives de performance et de comportement soient meilleures** dans l'environnement réel. Concernant l'effet des canaux sensoriels, nous nous attendions à ce que **l'ajout du canal auditif influence positivement la présence spatiale** et ses facteurs tout comme les résultats des mesures objectives.

De manière formelle, nos hypothèses étaient :

H1 : La variable [ENV] influencera significativement les réponses au questionnaire et les mesures objectives.

Plus précisément :

- Les échelles PS, ENG, ECO seront plus élevées dans la condition *RÉEL* tandis que l'échelle NEG sera plus élevée dans la condition *DISTANT* (**H1a**).
- Le SCORE sera plus élevé dans la condition *RÉEL* (**H1b**).

— L'HÉSITATION sera plus faible dans la condition *RÉEL* (H1c).

— La FLUIDITÉ sera plus élevée dans la condition *RÉEL* (H1d).

H2 : La variable [SEN] affectera significativement les réponses au questionnaire et les mesures objectives. Plus précisément :

— Les échelles PS, ENG, ECO seront plus élevées dans la condition *VISUEL+AUDIO* tandis que l'échelle NEG sera plus élevée dans la condition *VISUEL* (H2a).

— Le SCORE sera plus élevé dans la condition *VISUEL+AUDIO* (H2b).

— L'HÉSITATION sera plus faible dans la condition *VISUEL+AUDIO* (H2c).

— La FLUIDITÉ sera plus élevée dans la condition *VISUEL+AUDIO* (H2d).

3.4 Analyses statistiques et résultats

Dans cette section, les mesures obtenues lors de l'expérimentation sont analysées via des tests statistiques paramétriques et non paramétriques. Les résultats de ces tests sont ensuite présentés.

La section est ainsi divisée en quatre parties. La première décrit les effets d'interaction des deux variables « environnement » [ENV] et « sensorialité » [SEN]. La deuxième et la troisième partie décrivent respectivement l'effet de la variable [ENV] et de la variable [SEN] sur chacune des mesures. La dernière partie décrit la corrélation entre les réponses subjectives au questionnaire et les mesures objectives de performance et de comportement des participants.

Toutes les analyses ont été effectuées à l'aide de la version 3.4.1 du langage R¹³. Pour les tests statistiquement significatifs ($p < .05$), l'estimation de l'effet d'ampleur (effect size) r est précisée. Ce dernier est interprété comme suit : une valeur inférieure à +/- 0.30 représente un effet faible, une valeur comprise entre +/- 0.30 et +/- 0.50 représente un effet moyen et une valeur supérieure à +/- 0.50 représente un effet important.

3.4.1 Effet d'interaction

Afin d'analyser l'effet d'interaction des variables [ENV] et [SEN], une analyse de variance à deux facteurs ou « ANOVA » (two-way analysis of variance) a été calculée sur chaque mesure. A noter que les mesures non paramétriques ont été traitées suivant la procédure de « transformation de rang alignée » (en anglais « aligned rank transform ») avant de lancer l'analyse « ANOVA ».

Les résultats sont décrits dans le tableau 3.1. Ces derniers n'ont montré aucun effet d'interaction statistiquement significatif sur les mesures. Autrement dit, les deux variables indépendantes « environnement » et « sensorialité » n'ont pas montré d'influence significative l'une sur l'autre. Par conséquent, l'analyse s'est concentrée sur l'effet indépendant de chaque variable sur les mesures subjectives et objectives de l'étude.

13. R est un langage de programmation utilisé pour le traitement de données et l'analyse statistique.

TABLE 3.1 – Résultats de l'analyse « ANOVA » sur chacune des mesures. L'astérisque (*) indique les données traitées selon la procédure de transformation de rang alignée.

Mesures	F de Fisher	Valeur-p
PS*	$F(1, 52) = 1$	0.32
ENG*	$F(1, 52) = .21$	0.64
ECO*	$F(1, 52) = .6$	0.44
NEG*	$F(1, 52) = .12$	0.73
SCORE	$F(1, 52) = 3.7$	0.6
HÉSITATION	$F(1, 52) = .67$	0.42
FLUIDITÉ*	$F(1, 52) = 1.44$	0.24

3.4.2 Effet de la variable « environnement »

Mesures subjectives

Étonnamment, les résultats ont montré que les moyennes des quatre échelles du questionnaire étaient plus élevées dans la condition *DISTANT* surtout en ce qui concerne les deux échelles PS et ECO (voir figure 3.10 et tableau 3.2).

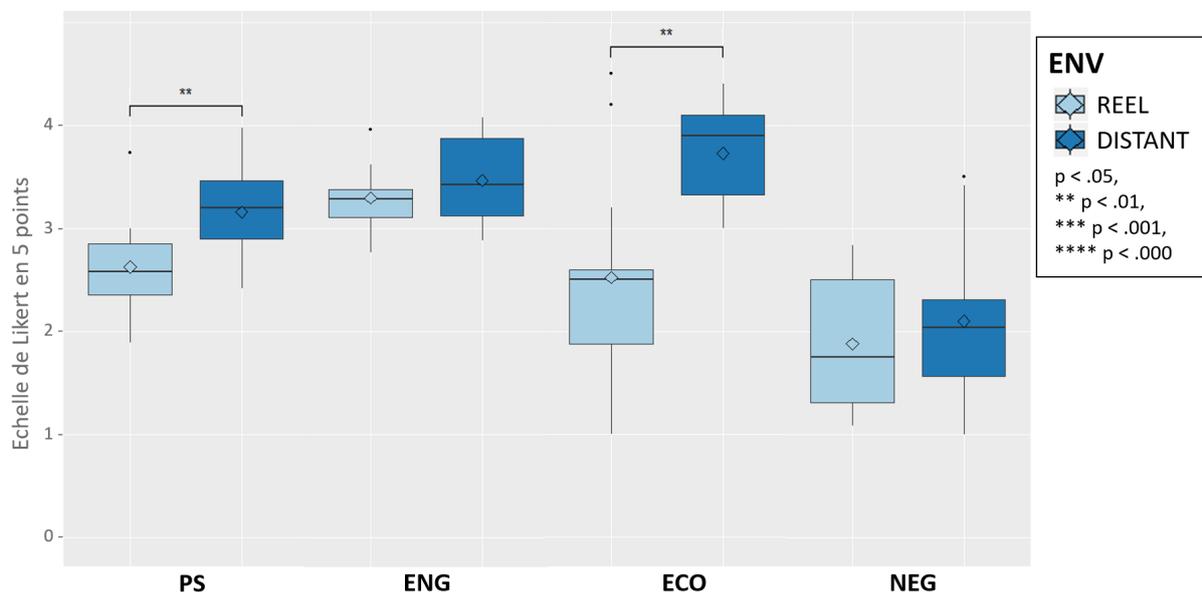


FIGURE 3.10 – Effet des conditions *RÉEL* et *DISTANT* sur chaque échelle de l'ITC-SOPI. Les diamants, les lignes à travers les boîtes et les points représentent respectivement la moyenne, la médiane et les valeurs maximum.

Un test indépendant « Wilcoxon Signed Rank » a été effectué sur chaque échelle entre les deux conditions *RÉEL* et *DISTANT*. Les résultats sont affichés dans le tableau 3.3. Aucune différence statistiquement significative n'a été constatée sur l'échelle ENG et NEG. A contrario, des différences significatives ont été trouvées sur l'échelle PS et

TABLE 3.2 – Effet des conditions *RÉEL* et *DISTANT* sur chaque échelle de l'ITC-SOPI : moyennes (M) et écart-types (α).

Mesures	RÉEL	DISTANT
PS	$M = 2.62 (\alpha = 0.45)$	$M = 3.15 (\alpha = 0.45)$
ENG	$M = 3.3 (\alpha = 0.37)$	$M = 3.47 (\alpha = 0.39)$
ECO	$M = 2.52 (\alpha = 0.95)$	$M = 3.73 (\alpha = 0.48)$
NEG	$M = 1.88 (\alpha = 0.63)$	$M = 2.1 (\alpha = 0.77)$

ECO avec, de manière inattendue, un meilleur score pour la condition *DISTANT*. Ces résultats vont à l'encontre de (H1a) qui prévoyait que la condition *RÉEL* soit meilleure que la condition *DISTANT*.

TABLE 3.3 – Résultats du test « Wilcoxon Signed Rank » sur les quatre échelles de l'ITC-SOPI entre les conditions *RÉEL* et *DISTANT*. Les cases colorées en vert indiquent les valeurs statistiquement significatives.

Mesures	Valeur-p	Effet r
PS	< .01	1.18
ENG	0.35	
ECO	< .01	1.61
NEG	0.53	

Mesures objectives

La figure 3.11 montre les valeurs moyennes des mesures objectives (SCORE, HÉSITATION et FLUIDITÉ). Le test de normalité « Shapiro-Wilk » effectué sur les trois mesures objectives a indiqué qu'elles suivaient une loi normale de distribution mis à part la mesure FLUIDITÉ (SCORE : $W = .96; p = .44$, HÉSITATION : $W = .98; p = .9$, FLUIDITÉ : $W = .92; p = .04$). Par conséquent, un t-test indépendant « Welch two-sample » a été effectué sur les mesures de SCORE et HÉSITATION tandis qu'un test indépendant « Wilcoxon signed-rank » a été effectué sur la FLUIDITÉ. Les résultats des tests (visibles dans le tableau 3.4) ont indiqué des différences statistiquement significatives sur les trois mesures en faveur de la condition *RÉEL* ce qui valide les hypothèses (H1b), (H1c) et (H1d).

3.4.3 Effet de la variable « sensorialité »

Mesures subjectives

Les moyennes des échelles PS, ENG et ECO de l'ITC-SOPI étaient toutes plus élevées dans la condition *VISUEL+AUDIO* à l'inverse de l'échelle NEG qui était plus faible dans cette même condition (voir figure 3.12 et tableau 3.5).

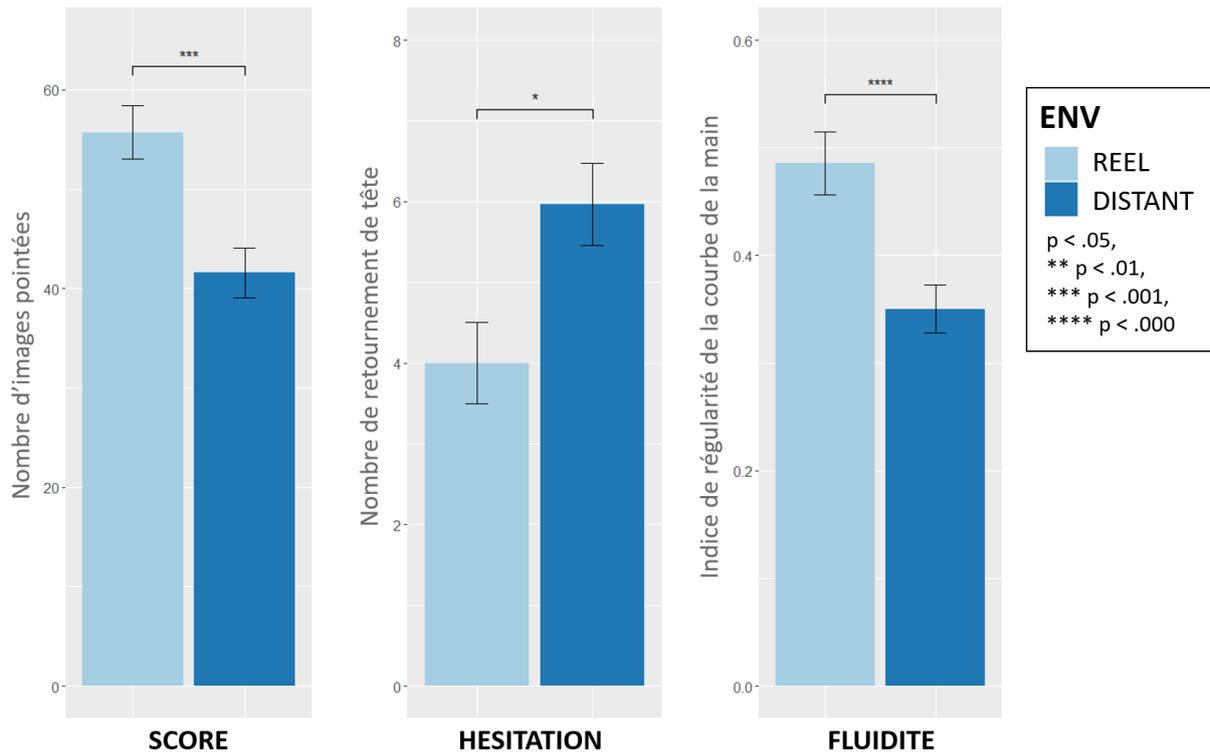


FIGURE 3.11 – Effet des conditions *RÉEL* et *DISTANT* sur les mesures objectives. Les barres indiquent les écarts-types.

TABLE 3.4 – Résultats des tests « Welch two-sample » (sur le SCORE et l'HÉSITATION) et « Wilcoxon signed-rank » (sur la FLUIDITÉ) entre les conditions *RÉEL* et *DISTANT*. Les cases colorées en vert indiquent les valeurs statistiquement significatives.

Mesures	Valeur-p	Effet r
SCORE	< .001	1.47
HÉSITATION	< .05	1.03
FLUIDITÉ	< .000	1.4

TABLE 3.5 – Effet des conditions *VISUEL* et *VISUEL+AUDIO* sur chaque échelle de l'ITC-SOPI : moyennes (M) et écart-types (α).

Mesures	VISUEL	VISUEL+AUDIO
PS	$M = 2.87 (\alpha = 0.52)$	$M = 3.27 (\alpha = 0.45)$
ENG	$M = 3.27 (\alpha = 0.44)$	$M = 3.54 (\alpha = 0.44)$
ECO	$M = 3.36 (\alpha = 0.86)$	$M = 3.48 (\alpha = 0.78)$
NEG	$M = 1.85 (\alpha = 0.54)$	$M = 1.76 (\alpha = 0.51)$

Un test dépendant « Wilcoxon Signed Rank » a été effectué sur chaque échelle du questionnaire entre les deux conditions *VISUEL* et *VISUEL+AUDIO*. Les résultats du test sont affichés dans le tableau 3.6. Ainsi, des diffé-

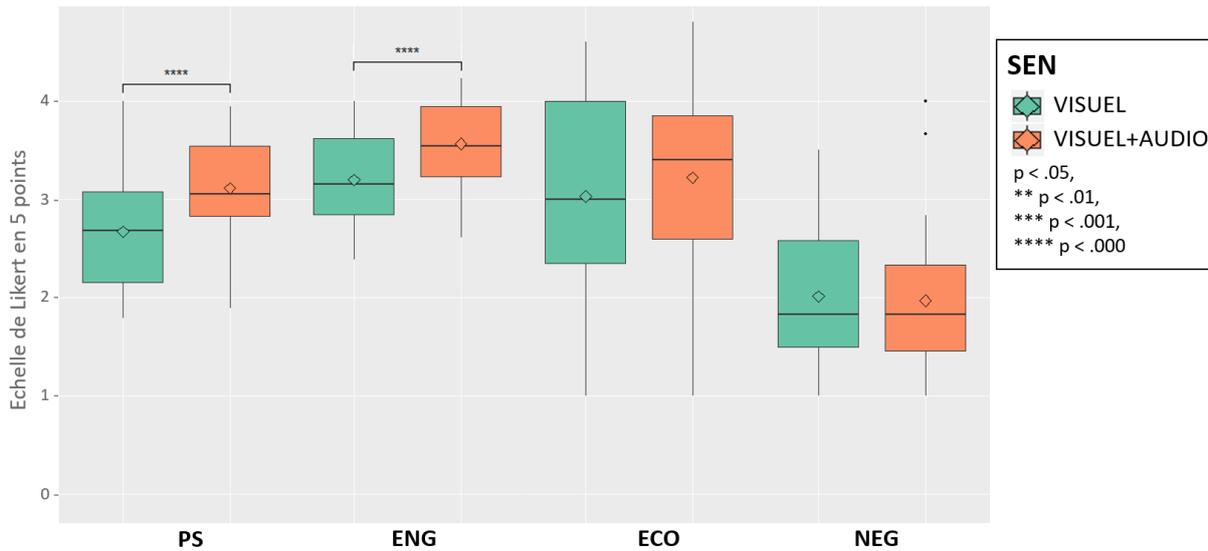


FIGURE 3.12 – Effet des conditions *VISUEL* et *VISUEL+AUDIO* sur chaque échelle de l’ITC-SOPI. Les diamants, les lignes à travers les boîtes et les points représentent respectivement la moyenne, la médiane et les valeurs maximum.

rences statistiquement significatives ont été observées sur l’échelle PS et l’échelle ENG en faveur de la condition *VISUEL+AUDIO* ce qui valide partiellement l’hypothèse (H2a). Toutefois, aucune différence statistiquement significative n’a été constatée sur les deux échelles ECO et NEG.

TABLE 3.6 – Résultats du test « Wilcoxon Signed Rank » sur les quatre échelles de l’ITC-SOPI entre les conditions *VISUEL+AUDIO* et *VISUEL*. Les cases colorées en vert indiquent les valeurs statistiquement significatives.

Mesures	Valeur-p	Effet r
PS	< .000	0.9
ENG	< .000	1.1
ECO	0.13	
NEG	0.99	

Mesures objectives

La figure 3.13 montre les valeurs moyennes des mesures objectives (SCORE, HÉSITATION et FLUIDITÉ). Le test de normalité « Shapiro-Wilk » effectué sur les trois mesures objectives a indiqué que seule la mesure de performance SCORE suivait une distribution normale (SCORE : $W = .97; p = .12$, HÉSITATION : $W = .95, p < .02$, FLUIDITÉ : $W = .82; p < .000$). Le t-test dépendant « Welch two-sample » a donc été effectué sur le SCORE, tandis que le test dépendant « Wilcoxon signed-rank » a été effectué sur les indicateurs comportementaux HÉSITATION et FLUIDITÉ. Les résultats des tests sont affichés dans le tableau 3.7. Ces derniers ont montré des différences statistiquement significatives sur les trois mesures en faveur de la condition *VISUEL+AUDIO* validant les hypothèses (H2b), (H2c) et (H2d).

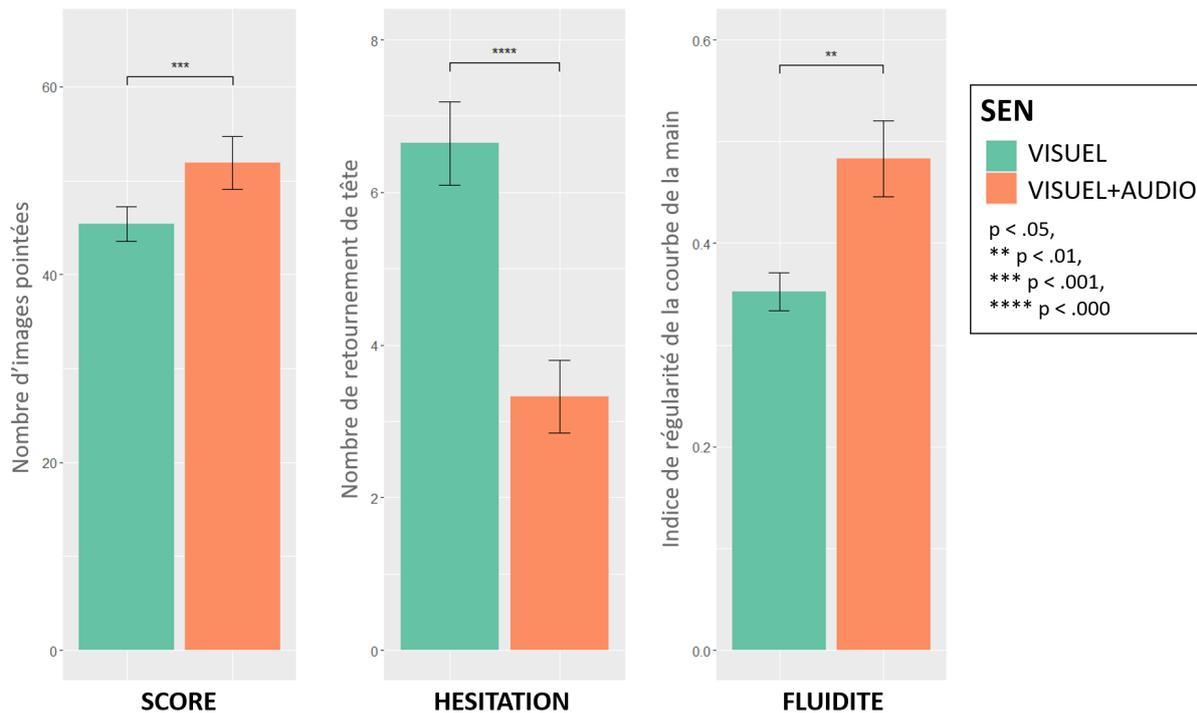


FIGURE 3.13 – Effet des conditions *VISUEL+AUDIO* et *VISUEL* sur les mesures objectives. Les barres indiquent les écarts-types.

TABLE 3.7 – Résultats des tests « Welch two-sample » (sur le SCORE) et « Wilcoxon signed-rank » (sur l'HÉSITATION et la FLUIDITÉ) entre les conditions *VISUEL+AUDIO* et *VISUEL*. Les cases colorées en vert indiquent les valeurs statistiquement significatives.

Mesures	Valeur-p	Effet r
SCORE	< .001	0.52
HÉSITATION	< .000	1.23
FLUIDITÉ	< .01	0.84

3.4.4 Corrélation entre les mesures subjectives et objectives

Afin d'évaluer la corrélation entre les réponses subjectives du questionnaire et les mesures de performance et de comportement dites objectives, un test de corrélation de « Pearson » a été effectué entre les échelles PS, ENG, ECO et NEG et les mesures SCORE, HÉSITATION et FLUIDITÉ. Les résultats n'ont indiqué aucune corrélation statistiquement significative entre les quatre échelles et la mesure de performance SCORE.

En ce qui concerne les indicateurs comportementaux, une corrélation statistiquement significative n'a été constatée qu'entre l'échelle NEG et la mesure HÉSITATION ($p < .05$) ainsi qu'entre l'échelle NEG et la mesure FLUIDITÉ ($p < .01$).

3.5 Interprétation des résultats

L'objectif principal de cette première étude exploratoire était de comparer la présence spatiale engendrée dans un environnement distant avec celle engendrée dans un environnement réel. Aussi, une importance particulière a été donnée à la fidélité sensorielle visuelle et auditive des deux environnements. En particulier, la reproduction d'une composante auditive distante précise était une préoccupation majeure pour atteindre des rendus comparables à la condition réelle [220].

Néanmoins, nous avons empiriquement constaté que la résolution spatiale du microphone ambisonique de premier ordre utilisé pour le système de RV était insuffisante pour reproduire la qualité de l'audition naturelle dans l'environnement réel. Afin d'explorer ce biais potentiel, nous avons analysé l'effet d'interaction des deux variables indépendantes de l'étude représentées par le type d'environnement (réel vs. distant) et le niveau de sensorialité (visuel+audio vs. visuel). Les résultats de l'analyse n'ont montré aucun effet d'interaction statistiquement significatif. Cela indique que la configuration audio (microphone 3D de 1^{er} ordre, restitution binaurale et évaluation empirique de la réverbération) a permis une localisation suffisamment précise pour permettre une comparaison fiable entre les deux environnements.

L'effet d'interaction ayant été écarté, notre analyse statistique s'est concentrée sur l'effet des deux facteurs (environnement et sensorialité) indépendamment de l'un et de l'autre. Une analyse a ainsi été effectuée sur les moyennes des quatre échelles du questionnaire ITC-SOPI (présence spatiale, engagement, validité écologique et effets négatifs). En plus de ces mesures subjectives, une analyse a été conduite sur la performance des participants lors de l'exécution de la tâche (leur score) ainsi que sur deux indicateurs de comportement à savoir, leur degré d'hésitation (extraits du mouvement de leur tête) et la régularité de la trajectoire de leur main pendant la tâche de pointage. Nous discutons les résultats ci-dessous.

3.5.1 Comparaison des rendus sensoriels

Les résultats de l'analyse statistique indiquent que **la présence spatiale ainsi que la validité écologique des environnements étaient plus élevées lorsque l'audio était présent** tandis que les effets négatifs, en particulier la désorientation des participants étaient plus faibles. Les résultats ont également fourni des preuves solides de **l'apport du rendu audio sur le renforcement de l'engagement des participants**. Ces résultats sont en accord avec des études précédentes en environnements virtuels sur l'utilité des indices sensoriels dans l'augmentation de la sensation de présence d'une part [221, 108] et la satisfaction des utilisateurs d'autre part [222]. De même, l'ajout du rendu audio a montré un bénéfice considérable pour l'amélioration de la performance des participants ainsi que leur comportement (moins d'hésitation et des mouvements plus réguliers).

3.5.2 Comparaison des environnements

Contrairement à nos attentes, les réponses à l'ITC-SOPI ont indiqué **un niveau de présence spatiale et de validité écologique significativement plus élevées dans l'environnement distant** que dans l'environnement réel. Une présence plus élevée dans la condition distante qu'elle ne l'est en condition réelle peut être considérée comme une « hyper-présence », phénomène déjà évoqué en environnements virtuels dans [32].

L'hyper-présence est un phénomène très contre intuitif qui peut trouver plusieurs explications. Dans le cadre de cette étude, l'hyper-présence pourrait s'expliquer notamment par le manque de familiarité des participants avec le système RV mis en place. Ce manque de familiarité a pu les amener à apprécier davantage l'expérience à distance et donc à lui attribuer de meilleurs scores. En effet, la majorité des participants (66,7%) débutaient dans l'utilisation des visiocasques de RV. De plus, les entretiens informels que nous avons menés après l'expérimentation ont montré l'enthousiasme des participants lors de l'expérience et leur grand intérêt pour une telle configuration de téléopération. Cela montre combien les réponses au questionnaire sont subjectives et fortement dépendantes des expériences antérieures des utilisateurs et de leurs intérêts respectifs. Ce constat encourage d'autant plus l'utilisation de mesures supplémentaires plus objectives.

Cette hyper-présence pourrait également être liée à l'attention allouée par les participants pour réussir la tâche. Ainsi, cette stratégie a pu être différente entre les deux conditions selon les difficultés et les contraintes inhérente au système dans la condition distante, se traduisant par un contrôle plus important et donc moins automatisé du geste de pointage. La tâche étant plus complexe, il en résulte une charge attentionnelle et de travail plus élevée pour essayer de maintenir un certain niveau de performance, expliquant alors le degré de présence spatiale plus élevé. Néanmoins, aucune différence significative du degré d'engagement des participants n'a été relevée entre les conditions réelle et distante.

Finalement, cette hyper-présence pourrait également être liée à la conception inter-sujets que nous avons suivi pour comparer les deux environnements réel et distant. Le choix de cette conception avait pour but principal d'atténuer l'effet d'apprentissage des participants lors de l'exécution de la tâche. Or, la sensation de présence spatiale étant subjective par nature, chaque participant l'a perçue et évaluée différemment en fonction de son interprétation personnelle du phénomène et de son échelle « interne » (mentale). A noter que l'utilisation de l'ITC-SOPI, qui s'est déjà révélé être un questionnaire de présence valide [34], devait permettre de réduire ce biais potentiel.

En ce qui concerne l'engagement (l'implication) des participants, ces derniers n'ont rapporté aucune différence entre les environnements ce qui peut facilement s'expliquer par la similitude de la tâche et du contenu des deux conditions (le but de la condition distante étant précisément de permettre aux participants d'opérer à distance dans l'environnement réel). De même, aucune différence n'a été perçue concernant les effets négatifs ce qui démontre le potentiel d'un tel système de téléopération en termes de qualité immersive visuelle, de précision de suivi et de réduction de la latence.

Ces résultats bien qu'intéressants, vont néanmoins à l'encontre de notre hypothèse selon laquelle l'environnement réel devait procurer un degré plus élevé de présence spatiale, de validité écologique et d'engagement, et des effets négatifs plus faibles.

Au contraire, l'analyse de la performance des participants a montré **une meilleure exécution de la tâche dans l'environnement réel**. Ce résultat peut s'expliquer majoritairement par les contraintes technologiques inhérentes au système de téléopération mis en place : le poids du visiocasque ainsi que le câblage a probablement poussé les utilisateurs à restreindre consciemment ou inconsciemment leurs mouvements. L'avatar de la main des participants a également pu engendrer une latence - bien que non perceptible - dans le pointage des images lors de l'expérience. Le même constat peut être fait concernant les deux indicateurs comportementaux extraits de la trajectoire de la tête et de la main des participants. Ainsi, il a été observé qu'en condition réelle les participants enregistraient :

- **un taux d'hésitation moins élevé** lors de la recherche des images ;
- et **une plus grande régularité du mouvement** lors du pointage des images.

Nous avons d'ailleurs remarqué pendant l'expérimentation que **les participants en condition distante avaient tendance à se mouvoir plus lentement et à restreindre leurs gestes** lorsqu'ils pointaient vers les images. Des interviews informels ont révélés qu'ils avaient l'impression de ne pas pouvoir se mouvoir librement à cause de **l'équipement de RV qu'ils portaient** (visiocasque RV et casque audio) et des câbles qui les entouraient.

3.5.3 Corrélation des mesures subjectives et objectives

La question d'une corrélation existante entre la sensation de présence spatiale et certaines mesures objectives a été soulevée dans de nombreuses études en RV (voir chapitre 1, section 1.5). En particulier, comme il est couramment constaté que les environnements immersifs augmentent à la fois la présence et la performance par rapport à des supports de médiation classiques [119, 223], plusieurs études ont émis l'hypothèse d'une corrélation entre la présence et la performance ([185], pp. 139-185).

Or, dans cette étude, aucune corrélation n'a été trouvée entre la présence spatiale perçue et la performance lors de l'exécution de la tâche de pointage. Ce résultat fait écho à d'autres travaux qui soutiennent que la présence et la performance ne sont pas liées par une relation causale [103, 169, 118] mais contredit néanmoins certaines études plus récentes [3].

De même que pour la performance, l'analyse statistique n'a indiqué aucune corrélation entre la présence spatiale et les deux indicateurs de comportement des participants. Cependant, nous émettons une réserve concernant la fiabilité de ce dernier résultat à cause de la différence de représentation de la main dans chaque environnement (main réelle du participant dans l'environnement réel et avatar 3D dans l'environnement distant). Cette différence pourrait en effet avoir affecté l'exécution de la tâche [224].

3.6 Conclusion et pistes d'amélioration

Ce chapitre a présenté la première étude expérimentale menée lors de la thèse. **L'étude a été publiée dans [225, 226]**. Nous y avons comparé deux environnements, l'un représentant une salle de bureau réelle et l'autre incarnant une captation à distance de cette salle en temps réel. Au total, 28 participants ont été invités à effectuer une tâche de pointage 3D en étant soit directement situés dans la salle réelle ou bien « transportés » à distance dans cette même salle à l'aide d'un système de téléopération. Nous avons également évalué l'utilité d'un rendu audio spatialisé en comparant deux modes de rendu sensoriel : l'un où les canaux visuel et audio étaient présents et l'autre où le canal audio était absent.

Tout comme dans le cas des environnements virtuels, les résultats ont démontré l'importance du rendu audio en environnements distants pour améliorer la sensation de présence spatiale et certains de ses facteurs. En particulier, l'implication des participants s'est avérée être fortement affectée par le rendu audio. Les indicateurs de performance et de comportement ont également confirmé l'utilité du rendu audio indépendamment du type d'environnement (réel ou distant).

Plus important encore, l'expérimentation nous a permis de mettre en évidence une sensation inattendue d'« hyper-présence » spatiale dans l'environnement distant. D'un autre côté, les indicateurs de performance et de comportement ont fourni des résultats qui étaient clairement en faveur de l'environnement réel. Aussi, aucune corrélation entre les mesures objectives et la présence spatiale n'a été trouvée.

Cette étude fut un premier pas vers la compréhension expérimentale de la présence spatiale dans cette thèse. D'un point de vue théorique, elle a permis d'évaluer la sensation de téléprésence qui reste très peu étudiée en tant que phénomène psycho-cognitif. Méthodologiquement parlant, l'étude a permis de se positionner sur le choix d'une conception intra-sujet pour mener à bien les prochaines expérimentations sur la présence, cela afin de réduire l'influence d'interprétation des participants. D'un point de vue plus technique, cette étude a été l'occasion d'appréhender la mise en place d'un système de téléopération combinant rendu visuel, audio et système de suivi de mouvements, tout en tenant compte de contraintes techniques comme la réduction de la latence, la gestion du réseau de communication et l'agencement du câblage des différents outils technologiques utilisés.

Mais surtout, les résultats de l'étude ont permis de faire ressortir plusieurs points à aborder dans la suite de la thèse, à savoir :

- **L'importance qu'ont les technologies de RV sur la perception et les actions des utilisateurs** et la nécessité de comparer les environnements distants et virtuels basés sur des interfaces de rendu similaires. L'objectif est d'analyser ce qui caractérise fondamentalement les environnements distants par rapport aux environnements virtuels à savoir, **la connaissance des utilisateurs de la réalité du lieu physique et des conséquences réelles qu'ont leurs actions sur ce lieu** [197]. Nous abordons cette problématique dans le chapitre 5 à travers l'étude de la présence spatiale dans trois environnements immersifs distant, virtuel et

réel, ce dernier servant de référentiel dans la comparaison des deux autres environnements.

- **La nécessité de continuer la recherche d'outils basés sur la performance et le comportement des utilisateurs** comme mesure objective de la présence spatiale. En particulier, les résultats contradictoires sur la présence et la performance nous encourage à mener d'autres évaluations. De plus, l'étude a souligné **le potentiel de l'analyse des trajectoires pour en extraire des indicateurs comportementaux**. Par exemple, si une tâche inclut de la navigation, l'analyse des retours arrières de l'utilisateur peut produire des données intéressantes [227]. Partant de ce constat, nous proposerons dans le chapitre 5 des indicateurs comportementaux liés à certaines métriques cinématiques.
- **La nécessité d'utiliser un questionnaire validé sur une population francophone**. Ainsi, le questionnaire utilisé dans cette première étude était rédigé et validé en anglais. Or, la majeure partie de nos participants est francophone. La validité d'un questionnaire n'étant pas extensible dans une autre langue que celle dans laquelle il a été validé [228, 229], nous nous sommes posé la question de la fiabilité de nos résultats et avons décidé d'**utiliser un questionnaire validé en français** dans nos prochaines expérimentations. Cependant, aucun questionnaire de présence validé sur une population francophone n'existait à ce stade. Une solution est proposée dans le prochain chapitre.

Répercussions sur le modèle de présence spatiale

En plus des résultats cités plus haut, cette étude exploratoire nous a permis d'approfondir notre conception de la présence spatiale. En conséquence, le modèle présenté précédemment (chapitre 2, section 2.4) devra prendre compte des réflexions suivantes :

- **Les technologies utilisées impactent énormément l'expérience des utilisateurs**. Plus précisément, la fidélité sensorielle (i.e. l'immersion) renforce l'implication et la fidélité motrice (i.e. l'interaction) augmente la performance des utilisateurs. De plus, selon les technologies et les moyens utilisés pour mettre en place le système (type et poids du matériel, nombre de câbles, etc.), les utilisateurs peuvent se sentir plus au moins à l'aise et être objectivement ou subjectivement plus ou moins libres de leurs mouvements pendant l'expérience ce qui réduit leur perception des actions possibles dans l'environnement (i.e. l'affordance). Nous sommes ainsi arrivés à la conclusion que **le système doit être considéré comme un support de médiation qui permet d'établir le cadre où l'expérience de la présence spatiale « peut » avoir lieu**¹⁴.
- En plus d'être impactée par l'immersion, **l'implication des utilisateurs est dépendante de la nature de la tâche** à accomplir plus que du contenu de l'environnement.
- La validité écologique de l'environnement (qui fait référence à son degré d'affordance et de cohérence) est un facteur important qu'il est nécessaire de prendre en compte lors de la comparaison entre environnements.
- **Il est primordiale de mettre en avant les caractéristiques individuelles dans l'émergence de la pré-**

14. Cette réflexion se base également sur les travaux de Slater [39] qui affirme que l'immersion délimite le cadre de la formation de la présence.

sence spatiale. L'étude a souligné que la satisfaction des utilisateurs influençait grandement leur degré d'implication dans l'expérience et par conséquent leur sensation de présence spatiale. Le niveau de satisfaction quant à lui était impacté par l'intérêt des utilisateurs pour le système mis en place mais aussi par leur manque de familiarité avec les outils technologiques utilisés.

- Pour finir, il est plus important de réduire la latence du système en terme de perception subjective qu'en terme technique (même si atteindre une faible latence « objective » reste primordiale). Ainsi, les résultats de l'étude ont montré que malgré la latence de l'environnement distant, les participants n'avaient perçu aucune différence avec l'environnement réel en terme d'effets négatifs.

Remarque : Le modèle révisé en fonction des réflexions ci-dessus sera présenté dans le chapitre 6 de ce manuscrit.

English Summary

While particular attention was given to assess spatial presence in real and virtual environments, few have been interested in measuring it in teleoperation situations. For this reason, the first experimental study conducted in this thesis consisted in **comparing the feeling of spatial presence between a real and a remote environment (respectively the so-called « *natural presence* » and « *telepresence* »)**. The real environment was represented by a real office while the remote environment was a remote capture of the same office in real-time.

The study also aimed to evaluate the usefulness of spatialized audio rendering by comparing between two sensory rendering modes, a multisensorial mode (with visual and audio renderings) and visual mode (without audio rendering).

Thus, 28 participants performed a 3D-pointing task while being either physically located in the real office or remotely transported using a teleoperation system, with varying sensory rendering mode. Once the task was completed, spatial presence and its components were evaluated using the ITC-SOPI questionnaire [34]. Besides, objective metrics based on user performance and behavior were registered.

Results showed the benefit of adding audio rendering in both real and remote environments to increase the feeling of spatial presence. In particular, participant involvement was found to be strongly affected by audio rendering. Performance and behavioral indicators also confirmed the usefulness of audio rendering

regardless of the type of environment. These results highlight **the importance of virtual reality technologies on user perception and actions**.

Moreover, results revealed an unexpected sense of **spatial hyper-presence and higher ecological validity in the remote environment**. In contrast, objective metrics prove higher in the real environment, which highlights the absence of correlation between spatial presence and the objective metrics used in the experiment.

Thus, this study was a first step towards the experimental understanding of spatial presence in this thesis. It allowed us to evaluate the feeling of telepresence, which remains little studied as a psychocognitive phenomenon.

The study also emphasized the need to use **a validated questionnaire on a French-speaking population**. Thus, the questionnaire used in this first study was written and validated in English. However, the majority of the participants were French-speaking. Since the validity of a questionnaire cannot be extended to a language other than the one in which it is validated [229], the decision was made to use a French questionnaire in the next experiments. However, no validated presence questionnaire on a French-speaking population existed at this stage. A solution is proposed in the next chapter.

The study presented in this chapter has been published (see [225, 226]).

**QUESTIONNAIRE DE PRÉSENCE SPATIALE
POUR LES MILIEUX IMMERSIFS
À DESTINATION DE LA COMMUNAUTÉ
FRANCOPHONE**

4.1 Introduction et motivation

L'étude exploratoire que nous avons menée précédemment (décrite dans le chapitre 3) nous a éclairé sur l'importance de disposer de méthodes d'évaluation qui soient valides. En effet, que se soit dans la recherche sur la présence ou dans tout autre domaine, **il est nécessaire d'utiliser des mesures à la fois valides, fiables et sensibles** afin d'obtenir des résultats les plus extrapolables possibles [34].

On dit d'une mesure qu'elle est valide si elle mesure bien ce qu'elle est supposée mesurer, dans notre cas, la présence spatiale et ses facteurs. La mesure est fiable si elle donne des résultats comparables dans des situations comparables. Le concept de fiabilité correspond ainsi à celui de « précision » et de « reproductibilité ». Enfin, la mesure est sensible si elle est capable de détecter des différences intra- et extra-sujets.

Lors de notre première étude, nous avons utilisé l'ITC-SOPI [34] pour mesurer la sensation de présence spatiale perçue par les participants. Le choix de ce questionnaire s'est notamment appuyé sur son respect des trois critères de fiabilité, validité et sensibilité. Toutefois, l'évaluation du respect de ces critères s'est faite sur une population anglophone. C'est un point important car les trois critères, en particulier la validité, ne se transmettent pas automatiquement d'une langue à l'autre lors de la traduction du questionnaire [228, 229]. Cela peut paraître contre-intuitif au premier abord mais trouve une explication dans le fait que certains termes font référence dans l'esprit d'un utilisateur à des concepts différents en fonction de la culture portée par la langue utilisée.

Cette thèse se déroulant en France, le français est tout naturellement la langue la plus parlée par les participants, d'où la nécessité d'utiliser un questionnaire de présence dont la fiabilité, validité et sensibilité aient été évaluées sur une population francophone. Or, comme nous allons le voir dans la section 4.2 de ce chapitre, un tel questionnaire n'existait pas encore au moment du déroulement de cette thèse.

Objectifs et plan du chapitre

Compte tenu du besoin, nous avons décidé de développer notre propre questionnaire de présence spatiale en ayant en tête deux critères bien précis :

- que le questionnaire soit **pensé et écrit en français** ;
- qu'il soit **sensible aux différents types d'environnements immersifs**. Autrement dit, qu'il soit capable de différencier la présence spatiale entre environnements réels, distants, mixtes et virtuels.

De façon plus générale, le travail décrit dans ce chapitre vise à mettre en lumière **la question de la traduction et de la validation d'un questionnaire à caractère psycho-cognitif dans un espace linguistique donné** (dans le cas qui nous occupe, pour la présence spatiale et pour l'espace francophone).

Ainsi, le chapitre retrace en détail la procédure que nous avons suivie lors du développement du questionnaire (ce dernier est consultable en annexe C). Plus précisément, la suite du chapitre est divisée en cinq parties. La première inventorie les questionnaires de présence (anglophones) qui existent dans la littérature. La deuxième

partie décrit la méthodologie de développement d'un questionnaire et donne un plan des étapes que nous avons suivies. Les troisième et quatrième parties détaillent les deux étapes principales du processus de développement, à savoir la construction et la validation du questionnaire. La dernière partie du chapitre conclut sur les contributions du questionnaire pour la recherche en présence mais aussi ses limitations, et pour finir son apport dans l'amélioration de notre modèle conceptuel de présence spatiale.

4.2 Questionnaires existants

Le premier « questionnaire de présence » peut être imputé à Barfield et Weghorst [16] qui ont proposé en 1993 un questionnaire structuré autour d'une seule dimension, « la présence », et comportant six items (questions). Se basant sur leur travaux, Slater et al. [31] ont proposé un questionnaire unidimensionnel dans lequel le score de présence est représenté par le nombre de réponses qui obtiennent un score de 6 ou 7 points (sur une échelle de Likert à 7 points). Un peu plus tard, en 1997, Kim et Biocca [41] ont conçu un questionnaire basé sur le concept de « transport » structuré en deux dimensions : (1) l'arrivée, définie comme « *la sensation d'être présent dans l'environnement médiatisé* » et (2) le départ, défini comme « *la sensation de ne pas être présent dans l'environnement non médiatisé* ».

La présence considérée très tôt comme une construction multidimensionnelle (voir chapitre 1), les chercheurs se sont logiquement concentrés sur l'élaboration de questionnaires à plusieurs échelles pour prendre en compte les différents facteurs qui influencent le phénomène. Le tableau 4.1 reprend les questionnaires multidimensionnels les plus connus et utilisés dans la littérature.

Ainsi, en 1998 puis en 2005, Witmer et Singer [40, 230] ont conçu un questionnaire de 32 items (référéncé dans la littérature comme le WS ou le PQ) basé sur trois facteurs : (1) l'implication, (2) la fidélité comportementale des interactions (en anglais, « naturalness ») et (3) la capacité de l'utilisateur à se concentrer sur la tâche. Le questionnaire bien que très populaire, n'a cependant pas permis de distinguer la sensation de présence - lors d'une comparaison menée par Usoh et al. [98] - entre un environnement réel et un environnement virtuel, ce qui laisse à penser que **la sensibilité du questionnaire n'est pas satisfaisante**. Mais surtout, le questionnaire est très critiqué pour le faible nombre d'items évaluant directement la présence [107, 101], **ce qui fait douter de sa fiabilité**. Néanmoins, le questionnaire a été **traduit et validé en français** par le laboratoire de cyberpsychologie de l'Université du Québec en Outaouais (UQO). Cette version franco-canadienne du WS porte le nom de « *questionnaire sur l'état de présence* » (QÉP) [231].

En 2000, Usoh et al. [98] ont développé le questionnaire « *Slater-Usoh-Steed* » (SUS) sur la base de trois concepts : (1) la sensation de présence dans un environnement virtuel, (2) la mesure dans laquelle l'environnement devient la réalité dominante et (3) la mesure dans laquelle l'environnement est mémorisée comme un « lieu » qui a été visité. La version actuelle du questionnaire comporte six questions dont **les critères de fiabilité et de**

TABLE 4.1 – Aperçu des questionnaires multidimensionnels de présence les plus utilisés dans la littérature.

Questionnaires	Auteurs	Année	Items	Dimensions
WS	Witmer & Singer [230, 40]	1998	32	Implication Fidélité des interactions Concentration sur la tâche
SUS	Usoh et al. [98]	2000	6	Présence spatiale Réalité dominante Mémorisation comme un lieu
ITC-SOPI	Lessiter et al. [34]	2001	44	Présence spatiale Engagement Validité écologique Effets négatifs
IPQ	Schubert et al. [175, 101]	2003	20	Présence spatiale Implication Degré de réalité Immersion Sensation d'être dans une histoire Conscience de l'interface Exploration Interaction et prévisibilité
MEC-SPQ	Vorderer et al. [156]	2007	32-64	Présence spatiale Allocation d'attention Actions possibles Implication Suspension de l'incrédulité Intérêt spécifique du domaine Modèle de situation spatiale Imagerie visuo-spatiale
TPI	Lombard et al. [102]	2009	04-08	Présence spatiale Immersion sociale Engagement Réalisme perçu Réalisme social Présence social en tant qu'acteur Présence sociale passive Présence sociale active

validité n'ont pas été testés. Il a également été critiqué pour ne mesurer qu'une seule dimension de la présence : « la présence en tant que moyen de transport » [102]. De plus, comme pour le WS, il n'a pas été en mesure de

faire la distinction entre la présence en environnement virtuel et la présence en environnement réel lors de l'étude comparative que les auteurs ont menée.

En 2001, Lessiter et al. [34] ont mis au point « *the Independent Television Commission Sense of Presence Inventory* » (ITC-SOPI), composé de 44 items organisés en quatre échelles : (1) la sensation de présence spatiale, (2) l'engagement de l'utilisateur, (3) la validité écologique de l'environnement et (4) les effets négatifs tel que le mal des simulateur. **Sa validité a été évaluée** par les auteurs lors de son élaboration. Il a aussi l'avantage d'être **applicable à plusieurs types d'environnements** et il est facile à administrer et à noter [185]. Pour finir, la large population à laquelle il a été administré lors de différentes études expérimentales a montré qu'il produisait **des résultats fiables** [48, 232, 233, 98]. Toutefois, son utilisation est quelque peu limitée en raison des restrictions imposées par ses auteurs en termes d'utilisation (une autorisation est nécessaire pour pouvoir l'utiliser pendant une période de temps restreinte et les réponses récoltées via le questionnaire doivent être transmises aux auteurs).

Quelques années plus tard, Lombard et al. [102] ont affiné l'ITC-SOPI et introduit « *the Temple Presence Inventory* » (TPI) structuré en huit échelles : (1) la présence spatiale, définie comme « *la sensation de transport* », (2) l'immersion sociale, (3) l'engagement, (4) le réalisme social, (5) le réalisme perçu (le degré de réalité), (6) la présence sociale en tant qu'acteur dans l'environnement, (7) la présence sociale passive et (8) la présence sociale active. Les auteurs ont montré sa fiabilité. Cependant, le faible nombre d'items (un item par échelle) rend **la validité (de structure) de l'inventaire douteuse**.

Schubert et al. [175, 101] ont présenté les résultats d'une analyse factorielle dans laquelle 246 participants ont répondu à une enquête en 75 points portant sur de nouvelles questions ainsi que des questions tirées de Carlin et al. [234], Ellis et al. [235], Slater et al. [31], Towell et Towell [236], Witmer et Singer [40] et Regenbrecht et al. [126]. Se basant sur cette analyse, ils ont développé un questionnaire qu'ils ont nommé l'« *Igroup Presence Questionnaire* » (IPQ), comprenant huit facteurs de 20 items. Trois des facteurs fusionnant 13 items, se sont avérés directement liés à la présence à savoir, (1) la sensation de présence spatiale, (2) l'implication et (3) le réalisme vécu (en anglais, « *experienced realism* ») ou le degré de réalité de l'environnement. Les cinq autres facteurs ont été considérés comme des caractéristiques techniques du système susceptibles d'influencer la présence : (1) la qualité de l'immersion, (2) la sensation d'être dans une histoire, (3) la conscience de l'interface, (4) l'exploration de l'environnement et (5) sa prévisibilité. L'IPQ a été traduit en français mais **aucune des deux versions anglaise et française n'ont été soumises à une procédure de validation** appropriée [237].

Enfin, Vorderer et al. [156] ont mis au point en 2004, « *the Measurement, Effects, Condition - Spatial Presence Questionnaire* » (MEC-SPQ). Le questionnaire est basé sur huit facteurs : (1) la présence spatiale, (2) l'allocation d'attention, (3) les actions possibles dans l'environnement, (4) l'implication de l'utilisateur, (5) la suspension de l'in-crédulité, (6) l'intérêt de l'utilisateur pour le domaine de la tâche, (7) le modèle de localisation spatiale (en anglais, « *Spatial Situated Model* ») et (8) l'imagerie visuo-spatiale. Ce questionnaire a l'avantage d'être **applicable à différents types d'environnements** et il a été démontré en plus qu'il était fiable. Cependant, son nombre variable

d'items (entre 4 et 8 par échelle, et entre 32 et 64 pour la totalité du questionnaire) rend la comparaison entre les différents environnements et les différentes études difficile. Pour finir, **la validité de structure du questionnaire n'a jamais été analysée.**

Le tableau 4.2 récapitule le nombre de critères satisfaits par chacun des questionnaires décrits ci-dessus. D'autres questionnaires de présence existent. Néanmoins, les questionnaires que nous avons listés sont les plus utilisés et sont donc représentatifs du contexte actuel. Pour résumer, mis à part l'ITC-SOPI, aucun questionnaire ne remplit les trois critères que sont la fiabilité, la sensibilité et la validité. D'un autre coté, le seul questionnaire à avoir été traduit et validé en français est le WS dont la sensibilité et la fiabilité ont été fortement critiquées.

TABLE 4.2 – Aperçu des questionnaires de présence les plus connus dans la littérature associés aux critères qu'ils satisfont.

Questionnaires	Fiabilité	Sensibilité	Validité	Traduit FR	Validé FR
WS [230, 40]				✓	✓
SUS [98]					
ITC-SOPI [34]	✓	✓	✓		
IPQ [175, 101]	✓			✓	
MEC-SPQ [156]	✓	✓			
TPI [102]	✓		✓		

Ainsi, il n'existe pas de questionnaires de présence dont tous les critères soient démontrés dans le contexte francophone. Cependant, les questionnaires existants restent des références dont nous pouvons et devons nous inspirer. Par conséquent, nous avons développé en français, notre propre questionnaire en combinant quatre des questionnaires les plus utilisés, à savoir le WS [40], l'ITC-SOPI [34], l'IPQ [175, 101] et le MEC-SPQ [156], auxquels nous avons ajouté nos propres questions liées, en particulier, à la fidélité sensori-motrice des nouveaux systèmes immersifs. Au vu de l'avancée technologique en matière d'interfaces utilisateur, ces questions pourraient mettre en lumière de nouveaux facteurs jouant également un rôle dans l'émergence de la présence spatiale.

Dans la section suivante, nous décrivons la méthodologie sur laquelle nous nous sommes basés pour développer le questionnaire.

4.3 Méthodologie de développement d'un questionnaire

Pour une meilleure compréhension de ce chapitre, la méthodologie¹ sur laquelle nous nous sommes appuyés pour tracer le plan de développement de notre questionnaire est décrite ci-dessous. Nos informations sont en partie extraites du livre « *Concevoir, traduire et valider un questionnaire* » [238] que nous recommandons au lecteur pour de plus amples détails. Notre plan de développement quant à lui, est détaillé dans la figure 4.1

En règle générale, le développement d'un questionnaire se divise en deux grandes étapes : l'élaboration ou la **construction** du questionnaire et sa **validation**, elles-mêmes divisées en sous-étapes.

4.3.1 Construction d'un questionnaire

Comme son nom l'indique, cette partie du processus consiste à produire une première version du questionnaire. Elle se divise en trois étapes : la conception, la traduction et l'évaluation qualitative du questionnaire. Selon l'objectif et le contexte d'utilisation de ce dernier, ces étapes ne sont pas nécessairement toutes prises en compte.

La conception

Elle comprend l'élaboration d'un premier jet de questions appelés « items » ainsi que le choix des modalités de réponses (ex., réponses en clair ou échelles visuelles analogiques). Pour ce faire, les aspects du ou des concepts qui seront recueillis par le questionnaire ainsi que la population ciblée sont définis. Cela permet de choisir le vocabulaire le plus approprié pour rédiger les items et de proposer différentes échelles au questionnaire, ces dernières représentent la « structure postulée » du questionnaire.

La traduction

Elle constitue la validation transculturelle du questionnaire. Elle est indispensable pour les items qui portent sur des dimensions sociales ou psychologiques (comme c'est le cas pour la présence spatiale) [229]. Elle suppose deux phases : une traduction littérale et une adaptation au contexte culturel de la population cible [239].

— **Traduction littérale.** Une méthode utilisée pour la traduction littérale des items est la méthode de « contre-traduction » [240]. Dans un premier temps, deux ou trois personnes bilingues - dont la langue maternelle est la langue cible - traduisent le questionnaire indépendamment des uns et des autres. Ces personnes doivent être informés des objectifs de l'étude ainsi que des concepts sous-jacents des items.

Dans un second temps, les versions obtenues dans la langue cible sont contre-traduites dans la langue source par de nouvelles personnes bilingues possédant cette fois-ci la langue source comme langue maternelle.

1. Bien que basée sur la littérature, cette méthodologie a été adaptée au contexte de la thèse, il en existe d'autres plus au moins différentes mais tout aussi correctes.

Finalement, les versions obtenues dans la langue source et la langue cible sont comparées par un comité de traduction constitué de plusieurs traducteurs et/ou d'experts du phénomène étudié. Le comité élabore alors sur la base du consensus, une nouvelle rédaction du questionnaire dans la langue cible. Trois critères vont guider cette reformulation : **une tournure grammaticale correcte, un vocabulaire accessible à tous et un style neutre.**

- **Adaptation au contexte.** Cette phase consiste à analyser **la clarté et la compréhensibilité des items** dans le contexte où ils seront administrés [241]. Lors d'un pré-test, le questionnaire est administré à un groupe représentatif de la population cible. Les personnes du groupe sont individuellement invitées à indiquer si elles rencontrent des difficultés lors du renseignement des items. La rédaction du questionnaire intègre alors le repérage de ces difficultés.

L'évaluation qualitative

Aussi appelé « réduction des items », le but de cette étape est d'évaluer la fiabilité (ou cohérence interne) de chaque échelle du questionnaire et la corrélation inter-item [242]. Pour ce faire, le questionnaire est administré à un échantillon représentatif de la population cible. Les réponses collectées sont ensuite analysées et **les items dont la fiabilité ou la corrélation ne sont pas satisfaisantes sont supprimés** de la rédaction du questionnaire.

4.3.2 Validation d'un questionnaire

La validation d'un questionnaire représente son évaluation quantitative. Elle consiste en **l'exploration de ses qualités métrologiques : fiabilité, validité et sensibilité au changement** [242].

La fiabilité est évaluée au cours du temps en contrôlant la similitude des réponses d'un même individu lors de plusieurs passages du questionnaire - à des temps différents - mais dans des conditions expérimentales identiques. L'évaluation de la sensibilité consiste à contrôler si les différences entre individus ou chez le même individu au cours du temps sont reportées de manière constante. Pour ce faire, on étudie la corrélation statistique entre les scores obtenus lors des différentes passations du questionnaire [243].

L'évaluation de la validité est en revanche souvent négligée du fait de l'imprécision du concept [244]. On distingue notamment la validité de contenu, la validité de critère et la validité de structure [245].

Validité de contenu

La validité de contenu (en anglais, « Content Validity »), aussi appelée cohérence interne ou fiabilité du questionnaire [246], s'intéresse à la pertinence des items et à la représentativité des échelles du questionnaire vis-à-vis du phénomène étudié [244]. Cet aspect est à considérer si la définition du concept étudié ne fait pas l'objet d'un consensus. Un item est considéré comme pertinent s'il correspond bien à l'échelle qu'il est censé explorer. Une

échelle est correctement représentée si elle est explorée par un nombre d'items correspondant bien à son importance par rapport au phénomène étudié.

Validité de critère

La validité de critère (en anglais, « Criterion Validity ») évalue le degré de concordance entre les résultats fournis par le questionnaire et ceux fournis par un instrument de mesure du phénomène pris comme base de référence. Cet autre instrument doit être une référence indiscutable appelée « *gold standard* » dans la littérature anglo-saxonne. Malheureusement, il n'existe pas de tel instrument de mesure dans le domaine de la présence spatiale. Par conséquent, nous n'avons pas évalué la validité de critère de notre questionnaire. C'est pour cette raison que nous ne détaillons pas plus cette étape. Cependant, plus d'informations concernant la validité de critère sont disponibles dans [238].

Validité de structure

La validité de structure (en anglais, « Construct Validity ») est évaluée soit en utilisant des mesures du même phénomène provenant d'autres sources que celles du questionnaire : on parle alors de « validité de structure **externe** », soit en utilisant les mesures même du questionnaire : on parle alors de « validité de structure **interne** » [244].

- **Validité de structure externe.** Elle ne peut s'évaluer sur une seule étude. Elle doit être confirmée ou infirmée au travers d'études menées par différents enquêteurs testant chacun différentes hypothèses.
- **Validité de structure interne.** Elle doit confirmer, par les données collectées, la structure postulée du questionnaire lors de la phase de construction. Plus précisément, le lien existant entre deux items appartenant à une même échelle - donc explorant le même concept sur le plan théorique - doit être plus fort que le lien pouvant exister entre deux items issus d'échelles différentes. Cette validité s'explore classiquement par **les analyses factorielles exploratoires et confirmatoires** [243].

Les analyses factorielles exploratoires (AFE) sont notamment basées sur des analyses en composantes principales (ACP) ou des factorisations en axes principaux (FAP) qui explorent les échelles sous-jacentes du questionnaire. La structure des échelles résultantes d'une AFE est ensuite évaluée à l'aide d'analyses factorielles confirmatoires (AFC). En outre, ces dernières permettent d'évaluer la **validité convergente et divergente** de chaque échelle :

- La validité convergente teste si les scores des items d'une même échelle sont corrélés positivement entre eux.
- La validité divergente étudie l'absence de corrélation entre les scores des différentes échelles du questionnaire.

Une dernière étape dans l'évaluation de la validité de structure consiste à tester la validité de l'ajustement ou **adéquation interne de la structure** du questionnaire. Pour ce faire, divers indices d'adéquation sont calculés et leurs scores sont comparés à des seuils de validité pré-déterminés. Cela permet d'évaluer à quel point la distribution théorique de la structure s'ajuste à la distribution empirique obtenue à partir des données échantillonnées de l'indice. On peut citer comme exemple, l'indice d'adéquation comparatif (en anglais, « Comparative Fit Index », CFI) qui produit un score entre 0 à 1, avec un score supérieur à 0.90 indiquant une bonne adéquation [247].

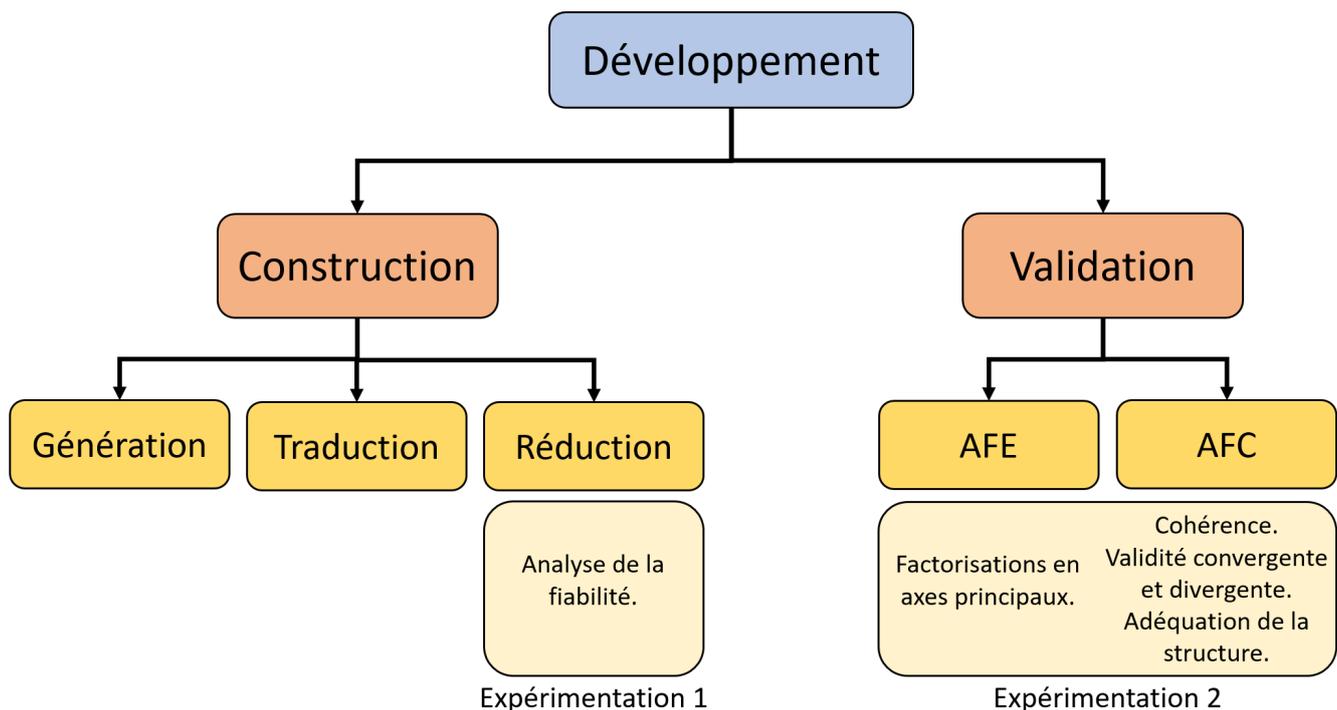


FIGURE 4.1 – Plan de développement du questionnaire.

La méthodologie que nous avons décrite dans cette section nous a aidé à mettre en place un plan de développement de notre questionnaire (figure 4.1). Ce plan comprenait deux étapes principales comme suit :

- **La construction du questionnaire**, qui est passée par les trois étapes d'élaboration, de traduction et d'analyse de la fiabilité des items. L'analyse a été exécutée après avoir administré le questionnaire lors d'une première phase d'expérimentations et a donné lieu à une réduction des items.
- **La validation du questionnaire**, qui s'est divisée en deux grandes étapes : une AFE (basée sur une FAP) pour explorer les échelles sous-jacentes du questionnaire puis une AFC pour tester la cohérence interne et la validité convergente et divergente des échelles ainsi que l'adéquation interne de la structure du questionnaire. Ces analyses ont été conduites après la récolte de nouvelles données lors d'une seconde expérimentation.

La suite du chapitre revient plus en détail sur chacune de ces étapes.

4.4 Construction du questionnaire

Cette section décrit les étapes que nous avons suivies pour construire le questionnaire, à savoir la procédure de génération des items, leur traduction et l'analyse de leur fiabilité. Les expérimentations menées pour collecter les réponses à analyser sont également décrites.

4.4.1 Construction de la structure

Avant de générer les items proprement dits, le questionnaire a d'abord été structuré en sept dimensions ou « échelles ». La première échelle avait pour but de mesurer directement la présence spatiale tandis que les six autres représentaient respectivement les six catégories de facteurs suivantes :

1. **Les facteurs liés au système** et à sa capacité à reproduire un environnement avec un haut degré de fidélité sensori-motrice [15, 204, 163].
2. **Les facteurs liés à l'environnement**, en particulier son degré de réalité et son niveau d'affordance [52].
3. **Les facteurs liés à l'utilisateur**, à savoir son implication [34], sa volonté de suspendre son incrédulité [12] et son niveau de satisfaction.
4. **Les facteurs liés à la tâche** et à l'attention qui lui est portée [156, 40].
5. **Les facteurs liés à la sensation de présence sociale** [51, 32] en particulier lorsque des avatars sont présents dans l'environnement [70].
6. **Les facteurs négatifs** représentés par la latence perçue par les utilisateurs (décalages et interruptions lors de l'expérience) [248] et le mal des simulateurs [165].

Ces catégories ont été construites en tenant compte des différentes approches (technique, rationnelle, écologique et psychologique) pour déterminer les facteurs (décrites dans le chapitre 2, section 2.2) et des questionnaires existants dans la littérature.

En outre, une attention particulière a été accordée à l'ajout d'items faisant référence à la **sensation de présence sociale** au vu de sa relation positive avec la présence spatiale [249, 250]. La présence sociale peut être ressentie en compagnie d'autres entités humaines ou non humaines (générées par ordinateur) qu'elles soient physiquement représentées ou psychologiquement assumées [56]. Cette sensation est renforcée par l'utilisation d'avatars qui renforcent l'**incarnation** des utilisateurs et leur offrent de nouvelles possibilités d'interaction avec les autres [71, 64, 251, 33].

Une autre catégorie que nous avons souhaitée inclure explicitement dans le questionnaire est la catégorie de **facteurs négatifs** de la présence spatiale. Plus précisément, nous avons inclus des items faisant référence à **la latence perçue** par des utilisateurs durant l'expérience d'un environnement. Ce facteur a plutôt été négligé

dans les questionnaires antérieurs. Pourtant, son influence sur la formation de la présence spatiale est largement démontrée. En effet, une forte latence provoque des ruptures d’affichage qui perturbent les utilisateurs et réduisent leur sensation de présence spatiale [86]. A l’inverse, les applications à faible latence créent une meilleure illusion d’un environnement qui répond instantanément et de manière continue aux actions des utilisateurs ce qui augmente leur degré de présence [248]. A noter que le niveau de latence n’a pas été inclus dans la catégorie des facteurs techniques du questionnaire. Ce choix est guidé par notre intérêt pour la latence « perçue » par l’utilisateur à différencier de la latence « objective » du système.

En plus de la latence, nous avons également inclus des items associés au **mal des simulateurs**, ce dernier faisant l’objet de nombreuses études démontrant une forte corrélation négative avec la présence spatiale [165, 166]. En raison de sa complexité, le mal des simulateurs est généralement mesuré à l’aide de questionnaires dédiés [252]. Par conséquent, à l’exception de l’ITC-SOPI, aucun questionnaire de présence ne comporte d’items liés au mal des simulateurs.

A l’instar des auteurs de l’ITC-SOPI, nous choisissons d’inclure ce facteur dans notre questionnaire, d’une part pour évaluer directement sa corrélation avec les autres échelles du questionnaire, et d’autre part pour réduire la fatigue des participants durant l’expérimentation (en leur demandant de ne remplir qu’un seul questionnaire).

Pour plus de clarté, nous avons attribué un nom et un code aux sept échelles de notre questionnaire comme suit :

- La présence spatiale ressentie [**PS**].
- La fidélité sensori-motrice du système [**FID**].
- L’affordance de l’environnement [**AFF**].
- L’implication de l’utilisateur [**IMP**].
- L’attention accordée à l’activité [**ATT**].
- La présence sociale ressentie [**SOC**].
- Les effets négatifs [**NEG**].

4.4.2 Génération des items

Selon la structure en sept échelles proposée, nous avons généré sept ensembles différents d’items. Afin de garantir une validité de contenu plus fiable, la sémantique d’une partie des items a été reprise de celles des questionnaires de référence (pour rappel, les questionnaires de référence étaient le WS [40], l’ITC-SOPI [34], l’IPQ [175, 101] et le MEC-SPQ [156]). Pour la génération du reste des items, nous les avons rédigés en tenant compte des règles suivantes [34] :

- Aucun item ne doit demander directement aux participants s’ils se sentent présents. En d’autres termes, **la compréhension du concept de présence ne doit pas être supposée.**

- Chaque item doit éviter d'aborder deux ou plusieurs questions.
- Les items ne doivent pas faire référence à des systèmes ou à des environnements spécifiques. Autrement dit, ils doivent être **indépendants de la forme et du contenu** de l'expérimentation.

Ainsi, 60 items ont initialement été générés. Une discussion entre membres de l'équipe a alors eu lieu afin de parvenir à un accord autour de la suppression des items redondants et de la fusion d'autres items (afin d'éliminer le chevauchement de contenu des items). Le questionnaire a ainsi été réduit à 50 items repartis sur les sept échelles comme suit :

- PS : 5 items.
- FID : 12 items.
- AFF : 7 items.
- IMP : 7 items.
- ATT : 9 items.
- SOC : 4 items.
- NEG : 6 items.

En ce qui concerne le choix de la modalité des items, nous avons opté pour une échelle de Likert à 5 points (1 pour « fortement en désaccord » et 5 pour « fortement d'accord ») afin de réduire le biais de la tendance centrale [253]. De plus, nous avons ajouté des questions en rapport avec le sexe, l'âge et l'expérience en RV. Enfin, dans le but de préserver l'intégrité des réponses, le questionnaire a été rendu anonyme.

4.4.3 Traduction des items

La génération des items s'est faite dans la langue des questionnaires de référence, soit l'anglais. Par conséquent, une phase de traduction du questionnaire vers le français était nécessaire.

La traduction a été effectuée par deux membres bilingues de notre équipe maîtrisant le concept de présence. Ces derniers ont appliqué **la méthode de « contre-traduction »** [240] comme suit :

- Dans un premier temps, les deux membres ont traduit indépendamment le questionnaire en français.
- Dans un second temps et sans consulter la version originale (en anglais), ils ont retraduit, toujours indépendamment, la version française du questionnaire vers l'anglais.
- Ils se sont ensuite réunis pour évaluer leurs versions françaises et anglaises et se sont mis d'accord sur les versions finales dans les deux langues.
- Finalement, les deux membres ont comparé leur version anglaise avec la version originale du questionnaire et ont apporté les modifications nécessaires à la version française pour parvenir à **une équivalence sémantique et contextuel satisfaisante** de tous les items. Cette opération ne s'est achevée qu'à l'obtention d'un consensus entre les deux membres sur l'absence d'incompatibilité terminologique avec la version originale.

Une deuxième étape de la phase de traduction a consisté à **analyser la forme et le contenu des items en**

termes de clarté et de compréhensibilité [241]. Pour ce faire, nous avons invité six personnes (trois autres membres de l'équipe ayant une bonne compréhension du concept de présence et trois personnes extérieures n'ayant aucune connaissance du concept) à indiquer individuellement leur accord ou leur désaccord concernant la clarté et la pertinence des items. Sur la base des commentaires reçus, certains items ont été reformulés afin d'être plus compréhensibles et pour garantir que le questionnaire puisse être rempli dans un délai raisonnable allant de 10 à 15 minutes.

4.4.4 Analyse et réduction des items

Une fois conçu dans sa forme initiale et traduit en français, la prochaine étape consistait à évaluer la fiabilité globale du questionnaire et la cohérence interne de ses items. Pour ce faire, une analyse a été effectuée sur des données collectées lors des expérimentations décrites ci-dessous.

Expérimentations

Le questionnaire a été administré à trois groupes de participants. Chaque groupe a été exposé à un environnement différent afin de prendre en compte la variabilité des systèmes et des contenus (i.e., accroître la sensibilité du questionnaire). Plus précisément, deux expériences ont été menées :

Expérience 1 : *Distant vs. Réel*. La première expérimentation que nous avons menée (décrite dans le chapitre 3) a été l'occasion d'administrer notre questionnaire aux participants (en plus de l'ITC-SOPI [34]). Pour rappel, les participants devaient effectuer une tâche de pointage soit en condition réelle, soit à distance à l'aide d'un système de télé-opération. La durée de l'expérience était de 15 minutes.

Expérience 2 : *Drone Arena*. Drone Arena² est un circuit intérieur de drones en immersion, ouvert au grand public. La figure 4.2 donne un aperçu de ce circuit. Ainsi, par groupe allant de 2 à 6 personnes, des joueurs s'affrontent lors de courses de drones sur le circuit, le but du jeu étant de terminer premier tout en évitant de « crasher » son drone.

Pour ce faire, chaque joueur est installé dans un siège, mains sur un volant et pieds sur des pédales qui servent à contrôler le drone. Les joueurs sont également équipés de visiocasques³ transmettant en temps réel les images issues de caméras embarquées sur les drones, leur permettant d'avoir une vue en première personne du circuit dans lequel les drones se situent (voir figure 4.3). Ce système de contrôle de drone unique en France permet aux joueurs une prise en mains intuitive réduisant drastiquement la période d'apprentissage (généralement trop longue pour mener des expériences de pilotage sur une population non experte). Ainsi, la durée moyenne d'une partie est d'environ 20 minutes et la population attirée par l'expérience est une population homogène non experte en

2. <https://www.dronearena.com/>

3. Du fait de la taille réduite des drones et des contraintes techniques de téléopération, les visiocasques utilisés sont monoculaires, les deux yeux voyant la même image.

pilotage de drone. Pour toute ces raisons et avec l'accord du propriétaire du site, nous avons choisi ce circuit pour administrer notre questionnaire.



FIGURE 4.2 – Image de gauche : un drone situé dans le circuit de Drone Arena. Image de droite : des joueurs installés dans la salle de pilotage.

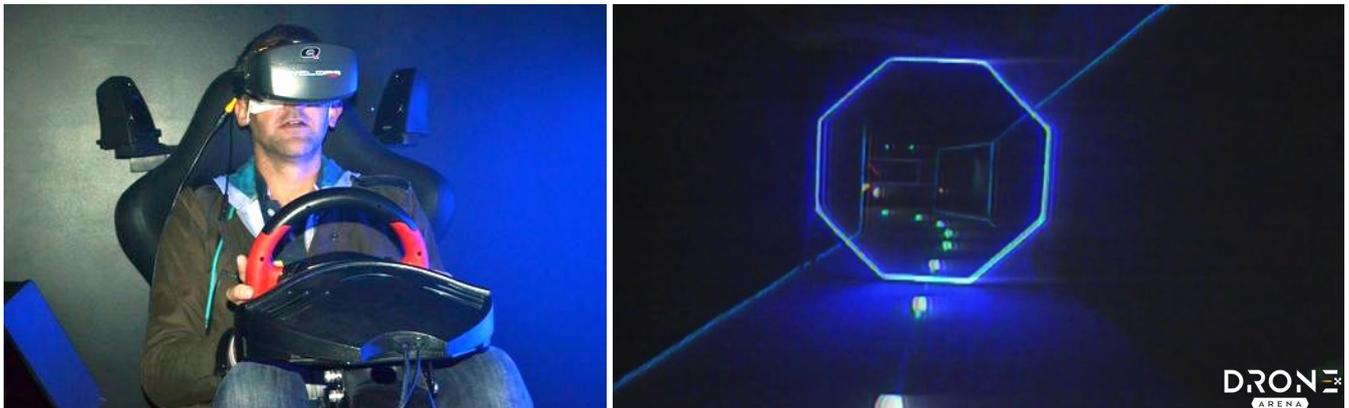


FIGURE 4.3 – Image de gauche : un joueur lors d'une partie équipé de tout le système. Image de droite : vue en première personne du participant dans le circuit.

Lors de ces expériences, nous avons pris soin que le questionnaire soit rempli dans un espace calme, soit en isolement (expérience 1), soit en petits groupes n'excédant pas six personnes (expérience 2). Avant de remplir le questionnaire, les participants étaient informés des objectifs de la recherche et signaient un accord de consentement éclairé garantissant l'anonymat et la confidentialité de toutes les données collectées. Le tableau 4.3 présente les données démographiques des participants pour chaque expérience. Quatre participants ont dû être retirés de l'analyse : un participant de l'expérience « Distant vs. Réel » en raison d'un problème technique et trois participants de l'expérience « Drone Arena » en raison d'absence de réponses à certains items du questionnaire. Au total, 65 participants ont fourni des données complètes que nous avons analysées.

TABLE 4.3 – Démographie des participants (A : aucune, D : débutant, I : Intermédiaire, E : expert)

Expérience		Participants	Sexe H / F	Age moyen et DS	Expérience en VR A / D / I / E
Distant vs. Réal	Condition réelle	14	13 / 3	26.5 +/- 4	7% / 64% / 7% / 21%
	Condition distante	14	8 / 6	28 +/- 5	28% / 42% / 14% / 14%
Drone Arena		37	25 / 12	30 +/- 7	40% / 49% / 11% / 0%
Total		65	46 / 19	29 +/- 6	31% / 50% / 11% / 8%

Analyse statistique et résultats

Les moyennes et écarts-types des réponses collectées ont été calculées pour chaque item et chaque échelle du questionnaire (voir tableau D.1 en annexe). Les analyses ont été effectuées avec la version 3.6.0 du langage R⁴.

La cohérence interne des échelles a été évaluée en calculant le coefficient alpha de Cronbach ou « coefficient α ». Ce coefficient représente une statistique dont la valeur est inférieure ou égale à 1, étant généralement considérée comme **acceptable à partir de 0.71** [254]. Dans notre étude, les coefficients α de chaque échelle étaient : $PS_{\alpha} = 0.72$, $FID_{\alpha} = 0.63$, $AFF_{\alpha} = 0.75$, $IMP_{\alpha} = 0.48$, $ATT_{\alpha} = 0.70$, $SOC_{\alpha} = 0.47$ et $NEG_{\alpha} = 0.80$. Quant au coefficient alpha du questionnaire, il était de $\alpha = 0.87$.

La cohérence interne des items associés à chaque échelle a également été évaluée à l'aide du coefficient α mais aussi en utilisant « le coefficient de corrélation inter-item de Pearson ». Les résultats sont illustrés en annexe D.2. Chaque item dont le coefficient α ne contribuait pas à élever le coefficient α de son échelle (c'est-à-dire qui réduisait le coefficient α de l'échelle) a été exclu du questionnaire. Il en a été de même pour les items dont le coefficient de corrélation était insatisfaisant (valeur inférieur à 0.3 [255]). En conséquence, 18 items ont été supprimés : PS - 1 item, FID - 6 items, AFF - 3 items, ATT - 2 items et NEG - 2 items. De plus, deux items ont été supprimés en raison des difficultés que certains participants éprouvaient à les comprendre : ATT - 1 item et NEG - 1 item.

Cette réduction des items a donné lieu à une nouvelle version du questionnaire se composant de 30 items répartis comme suit :

- PS : 4 items, $\alpha = 0.71$.
- FID : 6 items, $\alpha = 0.62$.
- AFF : 4 items, $\alpha = 0.71$.
- IMP : 5 items, $\alpha = 0.62$.

4. R est un langage de programmation utilisé pour le traitement de données et l'analyse statistique.

- ATT : 4 items, $\alpha = 0.73$.
- SOC : 4 items, $\alpha = 0.58$.
- NEG : 3 items, $\alpha = 0.85$.

Le coefficient α du questionnaire révisé était de 0.89 indiquant une bonne fiabilité. Aucune autre suppression d'items n'a été envisagée par la suite car les gains obtenus auraient été minimes. La phase de construction⁵ du questionnaire s'est donc achevée et nous sommes passés à la phase de validation.

4.5 Validation du questionnaire

La version révisée du questionnaire a été soumise à un processus de validation pour analyser sa fiabilité, sa validité de structure et son adéquation structurelle. Dans cette section, la collecte des données, la procédure d'analyse statistique et les résultats de ce processus sont décrits.

4.5.1 Expérimentation

Échantillon

L'ensemble de l'échantillon a été recruté au parc d'aventure RV ILLUCITY la Villette⁶. Ce parc propose 20 jeux immersifs répartis en trois catégories : **les jeux d'évasion**, **les jeux d'arcade** et **les expériences cinématographiques** (films de RV). Certains d'entre eux sont multijoueurs (allant jusqu'à 6 joueurs) tandis que d'autres se jouent en mode solo (voir figure 4.4). Selon le jeu, la durée de l'expérience peut varier de 5 à 40 minutes. Le parc est accessible à tout public, allant des habitués des jeux vidéos aux personnes n'ayant aucune expérience préalable de la RV.



FIGURE 4.4 – Image de gauche : mode solo. Image de droite : mode multijoueurs.

5. La complexité du processus de construction du questionnaire montre combien il est délicat de décrire des phénomènes psycho-cognitifs aussi complexes et multifactoriels que la présence, en vocables compréhensibles par tous.

6. <https://illucity.fr/en/>

Sur les 20 expériences disponibles, nous avons choisi les 12 jeux les plus populaires pour mener l'étude (la figure 4.5 illustre le jeu le plus apprécié « Toyland »). Le tableau 4.4 décrit chaque jeu ainsi que la taille de l'échantillon associé.



FIGURE 4.5 – Toyland. Images de gauches : joueurs. Image de droite : interface.

Après accord des gérants du parc, nous avons invité chaque personne ayant participé à l'un des 12 jeux à remplir notre questionnaire. Les personnes qui acceptaient étaient informées des objectifs de l'étude et signaient un formulaire de consentement éclairé. Une version papier du questionnaire leur était alors administrée. La durée pour remplir le questionnaire était d'environ 5 à 10 minutes selon les personnes. Après avoir rempli le questionnaire, les participants étaient priés de ne pas discuter du questionnaire avec d'autres personnes susceptibles de participer à l'enquête.

TABLE 4.4 – Description des 12 jeux du parc IIIUCITY choisis pour mener l'étude. Les jeux sont ordonnés en fonction de la taille de l'échantillon par ordre décroissant.

Jeu	Catégorie	Joueurs	Durée (min)	Échantillon
Toyland : Crazy Monkey	Arcade	3-6	25	53
Assassin's CREED : The lost Pyramid	Escape	2-4	40	43
The Raft	Arcade	2-4	10	20
Incarna	Escape	3-4	40	15
Eclipse	Escape	2-4	35	13
Space Pirate Trainer	Arcade	1	10	6
The Corsair's Curse	Escape	2-4	35	5
Space Flight	Film	1	7	4
Knightfall	Arcade	1	7	4
Ragnaröck	Arcade	2	15	2
Far Reach	Film	1	5	2
Asteroids	Film	1	11	2
Total				179

Ainsi, le questionnaire a été administré à un échantillon composé de 179 participants (119 hommes et 60 femmes) dont l'âge variait entre 18 et 56 ans ($M = 30.51$; $DS = 8.06$). Dix participants ont été retirés de l'analyse en raison de réponses manquantes dans leurs questionnaires. Sur les 169 participants restants, 42 (25%)

avaient une bonne expérience en RV, 83 (49%) disaient avoir une expérience modérée et 44 (26%) n'avaient jamais utilisé un système de RV. Ces pourcentages reflètent une grande homogénéité de l'échantillon. Les moyennes et écarts-types des 169 réponses au questionnaire sont reportés en annexe D.3.

Équipements

La figure 4.6 illustre les différents équipements. Dans tous les jeux, les participants étaient équipés de casques HTC Vive-Pro et de sacs à dos MSI VR One ou HP VR. Ces derniers permettent d'éliminer l'influence que peuvent avoir les câbles sur la mobilité des participants. Avec cette configuration, les jeux tournaient à 90/100 images par seconde (le taux de rafraîchissement visuel atteignait 90 ou 100Hz).

Pour les jeux d'arcade et d'évasion, l'interaction avec les environnements a été rendue possible grâce aux deux contrôleurs HTC-Vive standards, sauf pour Toyland où les contrôleurs ont été remplacés par des interfaces tangibles en forme de fusils. Pour les films de RV, les participants étaient assis dans un simulateur D-Box⁷ pour profiter d'expériences sensori-motrices riches.

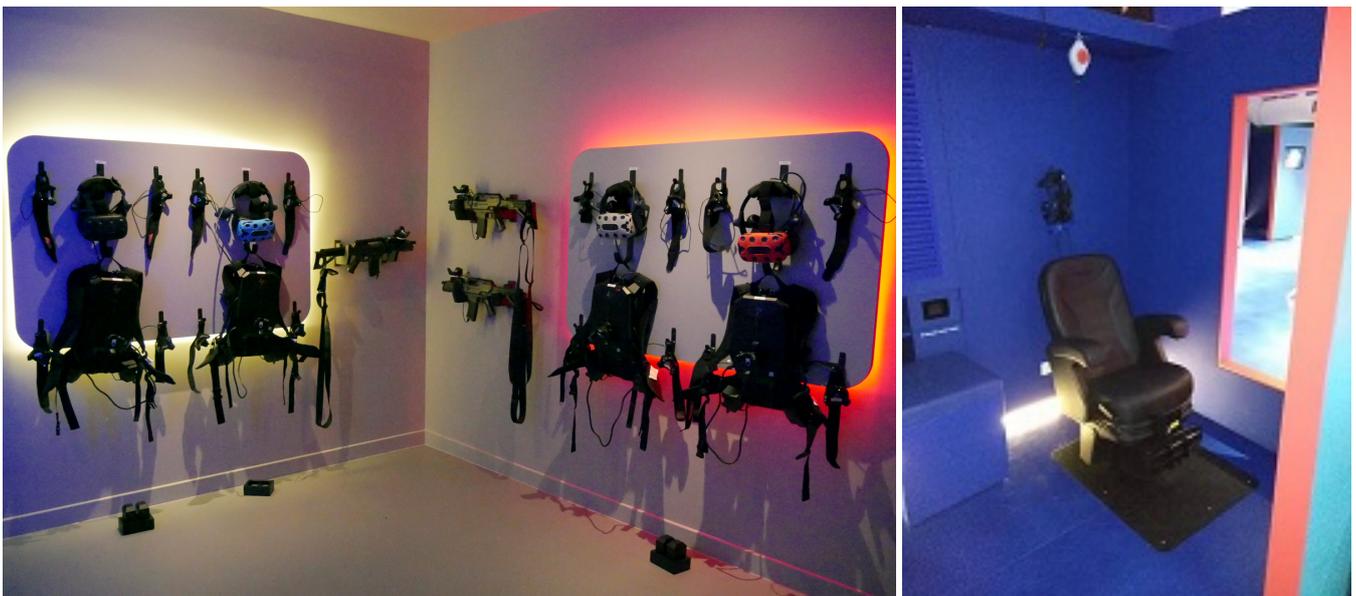


FIGURE 4.6 – Équipements du parc ILLUCITY. Image de gauche : casques HTC-Vive et leurs contrôleurs, sacs à dos MSI VR One et fusils. Image de droite : simulateur D-Box.

4.5.2 Analyses statistiques

Nous explicitons ici la procédure de validation que nous avons suivie :

1. Premièrement, une AFE a été exécutée pour explorer la structure sous-jacente du questionnaire en employant une factorisation en axes principaux (FAP) avec rotation oblique. En principe, les variables obtenues devraient coïncider avec la structure postulée du questionnaire.

7. <https://www.d-box.com/professionnels/expertise/simulation-et-formation/>

TABLE 4.5 – Valeurs seuils pour l'évaluation de la structure pendant les CFAs.

Indice d'ajustement	Valeur limite
Normed Chi-square (χ^2/df) [CMIN]	< 3
Normed Fit Index [CFI]	> 0.9
Goodness of Fit Index [GFI]	> 0.9
Trucker-Lewis Index [TLI]	> 0.9
Standardized Root Mean Square Residual [SRMR]	< 0.08
Root Mean Square Error of Approximation [RMSEA]	< 0.06

2. Deuxièmement, les données ont été soumises à des CFAs afin de confirmer la structure résultante de l'AFE. Plus exactement, la validité de structure a été évaluée en examinant les saturations factorielles (en anglais, « standard factor loadings ») de chaque item [256] ainsi que la validité convergente et discriminante de chaque échelle. La stabilité de la structure a également été évaluée en examinant la fiabilité des échelles. Finalement l'adéquation de la structure a été examinée par un ensemble d'indices d'ajustement comme suit (voir tableau 4.5) :

- a. Le Chi carré normalisé (en anglais, « normed Chi-square ») [CMIN] qui représente le ratio résultant de la division du chi carré (χ^2) par le degré de liberté (df). Cet indice d'ajustement indique quand la valeur d'ajustement n'est pas significative ($p > .05$). Selon Byrne, au dessus de 3, le ratio ne doit plus être accepté [257].
- b. L'indice d'ajustement (en anglais, « Goodness Fit Index ») [GFI], l'indice d'ajustement comparatif (en anglais, « Comparative Fit Index ») [CFI] et l'indice de Trucker-Lewis (en anglais, « Trucker-Lewis Index ») [TLI] également appelé indice d'ajustement non normalisé (en anglais, « Non-normed Fit Index ») [NNFI], qui produisent des scores allant de 0 à 1. Selon Bentler et Bonnet, les scores supérieurs à 0.90 indiquent un bon ajustement (i.e. une structure adéquate) [247].
- c. La moyenne quadratique résiduelle standardisée (en anglais, « Standardized Root Mean Square Residual ») [SRMR] est définie comme la différence standardisée entre la corrélation observée et la corrélation prédite. Une valeur inférieure à 0.08 est généralement considérée comme un bon ajustement [258].
- d. L'erreur quadratique moyenne d'approximation (en anglais, « Root Mean Square Error of Approximation ») [RMSEA]. Hu et Bentler suggère un seuil de 0.06 pour démontrer un ajustement acceptable [258].

4.5.3 Résultats et discussion

La validité des résultats des analyses factorielles est conditionnée par la taille de l'échantillon sur lequel elles sont utilisées. En général, on suggère qu'un ratio de (5 :1) (c'est-à-dire que pour chaque item il y a au moins 5 participants) est suffisant [259]. Dans notre étude, le nombre de réponses complètes est de 169 pour 30 items ce qui donne un ratio de 5.64 supérieur à (5 :1). Les analyses ont été effectuées avec la version 3.6.0 du langage R.

Analyse factorielle exploratoire - AFE

Une analyse parallèle utilisant la méthode de « minimisation du résidu » (MinRes) a suggéré que le nombre approprié de variables à extraire devait être sept [260]. Cette suggestion correspond au nombre d'échelles supposées lors de la phase de construction (section 4.4.3). Une factorisation en axes principaux (FAP) a donc été menée pour extraire les sept facteurs. Pour ce faire, une rotation oblique suivant la méthode « directe Oblimin » a été effectuée. Le tableau 4.6 indique les facteurs de saturation de chaque item résultants de la FAP. **Une saturation supérieure à 0.4 est conventionnellement considérée comme acceptable** [261]. Les items dont la saturation après rotation était inférieure à 0.4 sur les sept facteurs ont donc été supprimés.

Aussi, un test de « Bartlett sur la sphéricité » a été effectué dont le résultat était statistiquement significatif ($p < .000$). A cela s'ajoute une valeur globale de « Kaiser-Meyer-Olkin » (KMO) de 0.76. Ces deux résultats ont permis de **confirmer l'adéquation de l'échantillonnage des données pour effectuer des analyses factorielles**.

TABLE 4.6 – Résultats de la factorisation en axes principaux (FAP). Les valeurs acceptables sont colorées en vert. Les valeurs inférieures à 0.3 ont été omises.

	Code item	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
1	PS1	0.485		0.491				
2	PS2	0.492						
3	PS3	0.613						
4	PS4	0.665						
5	FID1	0.508				0.374		
6	FID2		0.569					
7	FID3	0.306	0.311					0.336
8	FID5		0.53					
9	FID6		0.408					
10	AFF2		0.489		0.36			
11	AFF3		0.488					
12	ATT1			0.622				
13	ATT2			0.551				
14	ATT3			0.634				
15	FID4				0.786			
16	AFF1				0.426			
17	AFF4				0.404			
18	IMP1					0.471		

19	IMP3					0.579		
20	IMP4				0.407	0.422		
21	IMP5					0.804		
22	SOC3						0.746	
23	SOC4						0.77	
24	NEG1							0.712
25	NEG2							0.405
26	IMP2			0.369				0.499
27	NEG3				-0.351			
28	ATT4	-0.351						
29	SOC1							
30	SOC2							
Valeurs propres		2.952	2.781	1.8	1.527	1.422	1.065	0.831
% de variance		10.50%	9.90%	6.40%	5.50%	5.10%	3.80%	3.00%
Variance total expliquée		44.20%						

Bien que tous les items aient été générés sur la base de questionnaires de référence et d'études empiriques, cinq items : FID3, ATT4, SOC1, SOC2 et SOC3 n'ont pas réussi à saturer de manière significative [> 0.4] sur un facteur. Tandis que deux items : PS1 et IMP4 ont eu la même saturation sur deux facteurs. Nous les avons donc retirés du questionnaire dans le but d'obtenir une structure simple [262].

Par ailleurs, l'item IMP2 s'est chargé sur l'échelle NEG (Effets négatifs) au lieu de l'échelle IMP (Implication). Or, ce dernier faisait référence à un aspect négatif de l'implication de l'utilisateur (« J'ai prêté attention aux incohérences dans l'environnement »). Nous l'avons donc accepté comme item de l'échelle NEG. L'échelle IMP quant à elle, a été renommée « **Agrément** » (AGR) car le reste de ses items (IMP1, IMP3 et IMP5) se référaient principalement à l'amusement et à la satisfaction des participants pendant l'expérience (ex. IMP5 : « Je me suis amusé(e) pendant l'expérience »).

De plus, les items initialement proposés comme items de l'échelle FID (Fidélité) se sont chargés à la place sur trois échelles différentes : FID1 sur l'échelle PS (Présence spatiale), FID 2, FID3, FID5 et FID6 sur l'échelle AFF (Affordance) et FID4 sur une nouvelle échelle. Ces résultats peuvent s'expliquer notamment par le malentendu possible entre d'une part, les items associés à la présence spatiale et ceux associés à la fidélité sensorielle du système (étroitement liés à l'immersion) et d'autre part, entre les items associés à l'affordance et ceux associés à la fidélité motrice. Cela expliquerait pourquoi une échelle de « fidélité sensori-motrice » n'est pas apparue lors de l'analyse exploratoire.

TABLE 4.7 – Redéfinition de la structure du questionnaire.

Échelle	Code	Nombre d'items	% variance
Présence spatiale)	PS	4	10.50%
Affordance	AFF	5	9.90%
Agrément	AGR	3	6.40%
Réalité	REAL	3	5.50%
Attention	ATT	3	5.10%
Présence sociale	SOC	2	3.80%
Effet négatifs	NEG	3	3.00%

Le résultat le plus intéressant reste néanmoins l'émergence d'une échelle caractérisée par des items qui décrivent la mesure dans laquelle **les utilisateurs ont la sensation que l'environnement est réel ou que leurs actions ont des conséquences**. Nous avons nommé cette échelle « **Réalité** » (REAL).

Au total, 23 items ont été sauvegardés. La structure à sept facteurs explique 44.20 % de la variance totale et a été redéfinie en fonction des items saturés sur les échelles comme décrite dans le tableau 4.7.

Analyses factorielles confirmatoires - AFCs

La nouvelle version du questionnaire a été soumise à une première AFC. Pour rappel, le but de cette étape est d'évaluer la validité et l'adéquation de structure ainsi que la cohérence interne du questionnaire.

Validité de la structure. La validité de la structure a été évaluée en examinant, pour chaque item, la saturation factorielle standard (en anglais, « Standard Factor Loading ») [SFL]. La validité convergente et la validité discriminante ont été évaluées en examinant respectivement pour chaque échelle, les valeurs de fiabilité composite (en anglais, « Composite Reliability ») [CR] et de variance moyenne extraite (en anglais, « Average Variance Extracted ») [AVE] [256]. La valeur limite du facteur de saturation d'un item avec son échelle a été fixé à 0.50 [263]. En ce qui concerne la validité convergente, il est recommandé qu'elle soit supérieur à 0.60 [264] tandis que la validité discriminante est considérée comme suffisante lorsque la valeur est supérieure à 0.50 [265].

Les valeurs obtenues par la première AFC sont indiquées dans le tableau 4.8. Les SFLs étaient supérieurs à 0.5 pour tous les items sauf trois : AFF1 (SFL = 0.43) et ATT1 (SFL = 0.45) dont les valeurs SFL sont considérées comme des valeurs « limites » et NEG1 avec une SFL très faible (SFL = 0.22). Les valeurs CR des échelles étaient toutes supérieures à 0.6 ce qui indique une bonne validité convergente, sauf pour l'échelle NEG (CR = 0.48) qui peut s'expliquer par la faible SFL de NEG1. Inversement, à l'exception de l'échelle SOC (AVE = 0.60), les valeurs AVE ne dépassaient pas la valeur de 0.5 indiquant une validité discriminante insatisfaisante.

Dans l'ensemble, les résultats ont montré une faible validité de structure. Par conséquent, les trois items présentant des valeurs de SFL inacceptables ont été retirés du questionnaire. Une deuxième AFC a alors été effectuée, dont les résultats sont présentés dans le tableau 4.9.

Cette deuxième analyse a révélé **une validité de structure plus satisfaisante** : tous les items ont montré une

TABLE 4.8 – Résultats de la première analyse factorielle confirmatoire (AFC1) : SFL pour chaque item, CR et AVE pour chaque échelle. Les valeurs non acceptables sont colorées en rouge.

Echelle	Item	SFL	CR	AVE
Présence spatiale	PS1	0.63	0.76	0.47
	PS2	0.68		
	PS3	0.69		
	PS4	0.65		
Affordance	AFF1	0.43	0.70	0.30
	AFF2	0.63		
	AFF3	0.56		
	AFF4	0.60		
	AFF5	0.59		
Agrément	AGR1	0.51	0.63	0.37
	AGR2	0.70		
	AGR3	0.60		
Réalité	REAL1	0.63	0.67	0.49
	REAL2	0.72		
	REAL3	0.54		
Attention	ATT1	0.45	0.61	0.36
	ATT2	0.56		
	ATT3	0.75		
Présence sociale	SOC1	0.75	0.74	0.60
	SOC2	0.79		
Effets négatifs	NEG1	0.22	0.48	0.25
	NEG2	0.59		
	NEG3	0.62		
TOTAL			0.87	0.36

valeur SFL acceptable [>0.5]. En ce qui concerne la validité convergente, toutes les valeurs CR étaient supérieures au seuil [>0.6], à l'exception de la valeur CR de l'échelle NEG qui a augmenté mais est restée limite. Enfin, la validité discriminante a montré de meilleurs résultats avec l'augmentation des valeurs AVE pour toutes les échelles. En particulier, les échelles PS, ATT et SOC étaient toutes au-dessus du seuil [>0.5] et l'échelle REAL présentait une valeur AVE limite. Cependant, les valeurs AVE des échelles AFF, AGR et NEG sont restées faibles.

Cohérence interne (fiabilité). La cohérence interne a été évaluée en calculant le coefficient α pour les échelles PS, AFF, AGR et REAL. En ce qui concerne les échelles ATT, SOC et NEG, leur faible nombre d'items (deux) a rendu impossible le calcul du coefficient α ⁸. Par conséquent, leurs cohérences internes ont été rapportées en

8. L'alpha de Cronbach est basé sur plusieurs hypothèses assez restrictives à savoir l'uni-dimensionnalité, l'absence de corrélation (uncorrelated errors) et l'équivalence tau. Au moins trois éléments sont nécessaires pour tester ces hypothèses [88].

TABLE 4.9 – Résultats de la deuxième analyse factorielle de confirmation (AFC2) : SFL pour chaque item et CR, AVE, coefficient α et corrélation de Pearson pour chaque échelle. Les valeurs acceptables sont colorées en vert.

Echelle	Item	SFL	CR	AVE	Coefficient α	Corrélation de Pearson
Présence spatiale	SP1	0.61	0.76	0.53	0.75	
	SP2	0.7				
	SP3	0.69				
	SP4	0.65				
Affordance	AFF2	0.60	0.68	0.38	0.67	
	AFF3	0.57				
	AFF4	0.61				
	AFF5	0.57				
Agrément	AGR1	0.51	0.63	0.37	0.63	
	AGR2	0.68				
	AGR3	0.61				
Réalité	REAL1	0.63	0.67	0.49	0.67	
	REAL2	0.73				
	REAL3	0.53				
Attention	ATT2	0.56	0.63	0.51		0.44 (p=0)
	ATT3	0.78				
Présence sociale	SOC1	0.80	0.74	0.60		0.59 (p=0)
	SOC2	0.74				
Effets négatifs	NEG2	0.66	0.53	0.35		0.37 (p=0)
	NEG3	0.53				
TOTAL			0.86	0.45	0.81	

utilisant les tests de corrélation de Pearson (avec un seuil minimum de 0.3 pour être considéré comme acceptable [255]).

Les coefficients alpha tout comme les corrélations de Pearson ont indiqué **une bonne cohérence interne des échelles** (voir tableau 4.9). La valeur alpha du questionnaire, quant à elle, a indiqué une bonne fiabilité globale [> 0.71]. Sur la base de ces résultats, aucun item supplémentaire n'a été supprimé.

Adéquation de la structure interne. Les valeurs des indices d'ajustement sont présentées dans le tableau 4.10. Tous les indices ont donné des valeurs acceptables selon leur seuil limite correspondant (voir tableau 4.5) à l'exception de l'indice TLI qui a obtenu une valeur légèrement inférieure à sa valeur seuil. Comme prévu, la taille de l'échantillon de l'étude s'est montré suffisante pour l'exécution des analyses factorielles [266]. En outre, parmi les indices d'ajustement utilisés, le RMSEA, moins sensible à la taille de l'échantillon [267], a indiqué un bon degré d'adéquation.

TABLE 4.10 – Valeurs des indices d'ajustement après les AFCs (les valeurs acceptables sont colorés en vert).

Indices	χ^2	df	CMIN	CFI	GFI	TLI	SRMR	RMSEA
Valeurs	200.01	149	1.34 ($p < .03$)	0.90	0.95	0.87	0.068	0.045 [0.027;0.061] ($p < .05$)

La structure interne du questionnaire a donc obtenu **un score d'ajustement global acceptable**. Le résultat de la phase de validation est un questionnaire composé de 20 items repartis sur sept échelles comme suit :

- PS : 4 items.
- AFF : 4 items.
- AGR : 3 items.
- ATT : 2 items.
- REAL : 3 items.
- SOC : 2 items.
- NEG : 2 items.

Le questionnaire ainsi développé a été nommé « SP-IE » [Spatial Presence for Immersive Environments]. Il est consultable en annexe C.

4.6 Conclusion et nouvelles pistes

Ce chapitre a présenté le développement de notre questionnaire, le SP-IE [Spatial Presence for Immersive Environments] pour mesurer la présence spatiale et ses facteurs sous-jacents en environnements immersifs. Le questionnaire est rédigé en français afin d'être utilisé au sein de la population francophone. Pour mener à bien le processus de développement, nous avons adopté une démarche divisée en deux grandes étapes, à savoir la construction du questionnaire puis sa validation à l'aide d'outils statistiques.

L'étape de construction a consisté à générer une structure « supposée » du questionnaire (sous forme d'échelles) et à rédiger les questions, appelées « items », associées à chaque échelle. La génération des items s'est appuyée sur les questionnaires les plus utilisés dans la littérature, à savoir le WS [230, 40], l'ITC-SOPI [34], l'IPQ [175, 163, 101] et le MEC-SPQ [156]. Se baser sur des questionnaires déjà existants nous a permis de **préserver la validité de contenu** de notre questionnaire lors de la phase de génération. Néanmoins, nous avons dû par la suite traduire les items en français (les questionnaires de référence étant en anglais). Enfin, une analyse de la corrélation et une réduction des items non fiables ont été réalisées afin d'obtenir **une fiabilité satisfaisante**. Les données analysées ont été collectées à partir d'une étude sur 69 participants dans un environnement réel et deux environnements distants.

L'étape de validation quant à elle, a visé à examiner la validité et l'adéquation de la structure du questionnaire ainsi que sa cohérence interne. Les données ont été collectées à partir d'une étude menée sur un échantillon de grande taille (179 participants) dans différents environnements virtuels. La récolte de données provenant d'environnements différents a permis de **garantir la sensibilité** du questionnaire. Une analyse factorielle exploratoire suivie de deux analyses confirmatoires ont permis d'examiner la structure du questionnaire. Une correction des items basée sur ces analyses s'est ainsi terminée par **un questionnaire à sept échelles comprenant 20 items**.

Les résultats de ces analyses ont également confirmé que la structure finale du questionnaire avait **une bonne cohérence interne et une validité convergente satisfaisante**. De plus, plusieurs indices d'ajustement ont montré **une bonne adéquation de la structure**. Cependant, la validité discriminante de certaines échelles s'est avérée être statistiquement insuffisante.

Ce processus de développement a donné lieu à un questionnaire bien structuré qui **soutient la multidimensionalité de la présence spatiale et relève son lien avec différents facteurs**, à savoir l'affordance de l'environnement, l'agrément de l'utilisateur, l'attention allouée à l'activité, le degré de réalité attribuée à l'environnement, la présence sociale (avec avatars) et certains effets négatifs en particulier, le mal des simulateurs.

Ce travail contribue ainsi à :

1. Proposer un questionnaire fiable et valide pour évaluer la présence spatiale dans les environnements immersifs au sein de la communauté francophone.
2. Vérifier l'existence d'une nature hiérarchique à plusieurs niveaux de la présence spatiale en mettant l'accent sur des facteurs négligés dans d'autres questionnaires de présence spatiale notamment l'affordance et le degré de réalité.

De façon plus générale, cela a permis de mettre en lumière la question de **la traduction et de la validation d'un questionnaire à caractère psycho-cognitif dans un espace linguistique donné**, dans le cas qui nous occupe, pour la présence spatiale et pour l'espace francophone. **Aussi, ce travail a fait l'objet d'une publication [268]**.

D'un autre côté, même si la structure factorielle du questionnaire a été confirmée, la **faible validité discriminante** obtenue encourage à mener d'autres études sur des échantillons de grande taille et dans différents environnements immersifs (en particulier les environnements mixtes qui n'ont pas été pris en compte). Cela permettrait d'examiner de nouveau les propriétés psychométriques du questionnaire mais surtout, ce serait l'occasion d'augmenter le nombre d'items de certaines échelles à faible validité discriminante.

Cependant, même si mener de telles études serait profitable pour affiner le questionnaire, nous avons choisi dans la suite de la thèse de concentrer nos efforts sur les autres types de mesures dites « objectives ». En effet, la caractéristique principale d'un questionnaire est qu'il doit être rempli par les participants après l'expérience dans le but de ne pas provoquer de ruptures réduisant la sensation de présence spatiale [95, 188]. Par conséquent, aussi fiable et valide qu'il soit, **le SP-IE ne fournit pas de mesure continue de la présence pendant l'expérience**. Cette limitation est commune à tous les questionnaires de type « post-intervention ».

Pour résoudre ce problème, nous suggérons de nous appuyer sur une approche « multi-mesures » [132, 128] combinant le questionnaire de présence (toujours perfectible) avec différentes mesures objectives, de préférence non invasives. Le but de cette approche est d'arriver à associer les scores obtenus des différentes échelles du questionnaire à d'autres variables ou constructions qui, en théorie, sont liées à la présence spatiale. Ainsi, dans la

suite de la thèse, nous avons axé nos efforts sur **l'analyse de la relation entre le questionnaire SP-IE avec des mesures objectives** extraites notamment d'observations comportementales.

Répercussions sur le modèle de présence spatiale

En plus des réflexions issues de la première étude (chapitre 3, section 3.6), le processus de développement du questionnaire a mis en évidence d'autres modifications à apporter à notre modèle. Nous les listons ci-dessous :

- L'assimilation des items en lien avec la fidélité sensorielle du système (i.e. l'immersion) à l'ensemble des items associés à la présence spatiale montre combien la relation est étroite entre les deux concepts. Nous soutenons ainsi que l'immersion est un pré-requis à l'émergence du phénomène. En d'autres termes, **elle délimite le cadre dans lequel l'expérience de la présence spatiale se produit.**
- L'assimilation des items en lien avec la fidélité motrice du système (i.e. l'interaction) à l'ensemble des items associés aux deux facteurs écologiques d'affordance et de réalité illustre **le rôle de l'interaction en tant que base dans la construction d'une représentation mentale - cohérente et licite - des actions possible dans l'environnement.**
- Le remplacement du facteur d'implication proposé au début de l'élaboration du questionnaire par un facteur dit d'agrément de l'utilisateur nous pousse à considérer la relation qui les lie de plus près.
- Mais surtout, l'analyse factorielle a souligné la différence d'impact des facteurs sur la présence spatiale. Précisément, un ordre des facteurs en fonction de leur importance dans l'explication du phénomène a été établi comme suit :

Affordance > Agrément > Réalité > Attention allouée > Présence sociale > Effets négatifs

Ainsi, le facteur écologique d'affordance (incluant la possibilité d'agir et l'adéquation entre la réactivité de l'environnement et les attentes de l'utilisateur) et le facteur psychologique d'agrément (incluant la satisfaction et l'intérêt de l'utilisateur pour la tâche) doivent être soulignés dans le modèle **en tant que facteurs principaux**. Il en va de même pour le degré de réalité attribué à l'environnement qui doit être mis en évidence dans le modèle (mais pas autant que l'affordance).

English Summary

This chapter describes the development of an instrument for measuring spatial presence in the context of immersive environments : **the SP-IE [Spatial Presence for Immersive Environments] questionnaire**. The questionnaire is written in French for use within the French-speaking community and can be found in the appendix C.

To carry out the development process, an approach divided into two main steps was followed, namely the **construction** of the questionnaire and its **validation** using statistical tools.

The construction stage consisted in generating a potential scale-structure of the questionnaire and the questions, called « *items* », associated with each scale. This stage was based on the most commonly used presence questionnaires in the literature, namely the WS [230], the ITC-SOPI [34], the IPQ [175], and the MEC-SPQ [156], which allowed **to preserve the content validity of the SP-IE questionnaire**. Then, the items was translated into French. Finally, a first raw version of the questionnaire was administered to 67 participants experiencing real and remote environments. The data collected were submitted to an item reduction procedure based on correlation and reliability tests.

The validation stage aimed at examining the structure validity, adequacy, and internal consistency of the questionnaire. The data were collected from a study

conducted on 179 participants experiencing different virtual environments. The comparison of different environments allowed **ensuring the sensitivity of the questionnaire**. Thus, exploratory and confirmatory factor analyses were employed to examine the structure of the questionnaire. These analyses resulted in **a seven-scaled questionnaire of 20 items with overall good internal consistency and satisfactory convergent validity of the scales**. In contrast, the discriminant validity of some scales proved to be statistically insufficient and encourages further investigations.

This development process resulted in a well-structured questionnaire that supports **the multidimensionality of spatial presence and highlights its relationship with different factors**, namely affordance of the environment, user's enjoyment, attention allocated to the activity, degree of reality attributed to the environment, social embodiment using avatars, and some negative effects mainly cybersickness.

More generally, this work has shed light on the question of **the translation and validation of a psychocognitive questionnaire in a given linguistic space** (in this case, a spatial presence questionnaire for the French-speaking population).

The development of the SPIE questionnaire has been published (see [268]).

———— CHAPITRE 5 ————

**RÉALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT ET
PRÉSENCE SPATIALE : ÉTUDE COMPARATIVE**

5.1 Introduction et motivation

Les résultats de la première expérimentation que nous avons menée (chapitre 3) ont mis en évidence une sensation inattendue d'« hyper-présence » (mesurée par l'ITC-SOPI [34]). Cette hyper-présence pourrait être une conséquence du manque de familiarité des participants avec les équipements utilisés dans l'environnement distant (en particulier, le visiocasque employé). Ce manque de familiarité a ainsi pu amener les participants à apprécier davantage l'expérience dans l'environnement distant et à attribuer par conséquent, de meilleures notes en terme de présence ressentie [226].

Afin d'infirmer ou de confirmer la validité de cette hypothèse, il est nécessaire d'obtenir des résultats concordants lors d'expériences comparables. Ainsi, nous avons décidé de comparer à nouveau la présence spatiale entre deux environnements réel et distant, en y ajoutant cette fois-ci un environnement virtuel perçu à l'aide de technologies de RV similaires à celles utilisées pour percevoir l'environnement distant (l'environnement réel servant alors de base de référence).

La motivation de l'ajout de cette nouvelle condition est la suivante : selon l'environnement, certains facteurs peuvent être plus ou moins prévalents et conduire à une variation de la présence spatiale ressentie. C'est notamment le cas entre environnements virtuels et distants. Une différence notable est que, dans le cas d'un environnement virtuel, les conséquences des actions des utilisateurs sont limitées à l'espace généré par l'ordinateur alors que dans le cas distant, l'interaction dans l'environnement induit des conséquences réelles sur l'espace physique.

Pour rappel (voir chapitre 3 pour plus de détails), un environnement est considéré comme distant si :

- Il permet **la perception à distance d'un lieu réel**, soit par la médiation de canaux sensori-moteurs, soit par la représentation virtuelle du lieu, soit les deux via les technologies de Réalité Augmentée (RA).
- Les actions des utilisateurs ont un **impact réel** sur le lieu physique distant et ils ont **conscience** de cet impact.

Ainsi, la comparaison entre environnements réel, distant et virtuel permettra non seulement d'évaluer l'impact de la technologie sur la présence spatiale mais aussi d'étudier **dans quelle mesure l'existence de l'espace et la conscience des utilisateurs des conséquences de leurs actions engendrent une sensation de présence différente**.

A notre connaissance, aucune étude de ce type n'a été menée auparavant. Avec les récentes avancées technologiques qui permettent de développer des environnements distants et virtuels hautement immersifs, il est devenu possible de combler cette lacune.

Un autre point que nous souhaitons aborder au cours de cette étude est **la relation du questionnaire SP-IE que nous avons développé (chapitre 4) avec d'autres mesures objectives**, de préférence non invasives telles que les observations comportementales. Cette démarche entre dans le cadre de notre souhait de développer une approche « multi-mesures » de la présence.

Objectifs et plan du chapitre

Dans la continuité de notre première étude décrite en chapitre 3, nous présentons ci-dessous une étude qui compare l'exécution d'une tâche de navigation dans un espace physique réel avec la même tâche effectuée dans le même espace à distance d'une part, et dans une représentation virtuelle de cet espace d'autre part. Les représentations distante et virtuelle seront présentées dans un visiocasque de Réalité Virtuelle (RV) avec des conditions visuelles, auditives et d'interaction quasiment identiques. Le choix d'une tâche de navigation vise à étendre la première étude menée, où l'utilisateur était assis, à une situation dynamique où un déplacement est requis pour réaliser la tâche. Cela permettra notamment d'observer des indices comportementaux plus variés.

La présence spatiale et ses facteurs seront évalués après l'exécution de la tâche à l'aide de notre questionnaire SP-IE [268]. Les performances des participants durant l'expérience tout comme certains traits de comportements seront également enregistrés dans le but d'en extraire des mesures objectives. Les corrélations potentielles entre les scores du questionnaire et ces mesures objectives pourront ainsi être examinées. L'objectif que nous nous fixons est d'associer les scores obtenues dans les différentes échelles du questionnaire à d'autres mesures de la présence spatiale.

La suite du chapitre est divisée en quatre parties principales. La première décrit la mise en place de l'expérimentation, le protocole d'évaluation et les hypothèses. La deuxième et la troisième partie présentent respectivement les résultats de l'analyse statistique effectuée et l'interprétation de ces résultats. La dernière partie du chapitre conclut par la mise en lumière de nouvelles perspectives et par les améliorations - déduites de l'étude - à apporter au modèle de présence spatiale.

5.2 Conception, mise en place et déroulement de l'expérimentation

5.2.1 Conception de l'expérimentation

Les environnements réel, distant et virtuel

L'objectif principal de l'étude était de comparer la sensation de présence spatiale et ses facteurs sous-jacents ainsi que les performances et le comportement utilisateur dans trois environnements immersifs différents représentant le même espace :

- Un **environnement réel** représentant la situation où le participant est physiquement situé dans l'espace expérimental et effectue la tâche directement sans aucune médiation technologique.
- Un **environnement distant** représentant la situation où le participant est situé à distance dans l'espace et effectue la tâche à l'aide d'un système de téléopération dédié.
- Un **environnement virtuel** reproduisant aussi fidèlement que possible l'espace physique en termes de per-

ceptions visuelles et sonores ainsi qu'en termes de métaphore de navigation.

La tâche de navigation

La conception de la tâche a été guidée par plusieurs considérations susceptibles d'accroître le sensation de présence spatiale, à savoir :

- que le participant puisse se déplacer dans son environnement de manière contrôlée ;
- qu'il prenne des décisions sur la base d'informations recueillies dynamiquement lors de ses déplacements ;
- que ses actions soient susceptibles d'avoir des conséquences irréversibles dans l'environnement.



FIGURE 5.1 – Fauteuils roulants électriques. Image de gauche : fauteuil réel. Image de droite : fauteuil virtuel.

Une tâche de navigation nous a paru la plus susceptible de remplir ses conditions. Pour pouvoir naviguer, nous avons doté les participants d'un fauteuil roulant électrique (voir figure 5.1). Le fauteuil était réel dans les environnements réel et distant et virtuel dans l'environnement virtuel.

La tâche consistait alors à **manipuler le fauteuil pour naviguer dans l'environnement en suivant un itinéraire (chemin) tout en évitant quatre obstacles** à savoir, deux pyramides de boîtes de conserves (qui sont en fait issues d'un jeu de chamboule-tout) et deux chaises de bureau standards (voir figure 5.2). Ces objets ont été soigneusement choisis car ils sont très courant : leur affordance est immédiate et les conséquences d'une collision entre le fauteuil et ces objets sont prévisibles, irréversibles (chute des boîtes, déplacement de la chaise) mais sans aucun danger (pas de risques, objets peu fragiles).

L'itinéraire était le même pour tous les participants mais ils ne le connaissaient pas à l'avance. Au lieu de cela, **la direction à suivre était indiquée pendant l'expérience par sept panneaux** (voir figure 5.3). Chaque panneau



FIGURE 5.2 – Aperçu des obstacles. Image de gauche : configuration réelle. Image de droite : configuration virtuelle.

possédait un numéro « extérieur » et un numéro « intérieur » :

- Le numéro extérieur représentait le numéro identifiant le panneau actuel.
- Le numéro intérieur indiquait le prochain panneau vers lequel le participant devait se diriger.



FIGURE 5.3 – Panneaux. Image de gauche : réel. Image de droite : virtuel.

Ainsi, au début de l'expérience, on indiquait au participant le numéro du premier panneau. Ce dernier indiquait à son tour le numéro du second panneau et ainsi de suite. En outre, selon la localisation des participants dans « l'espace de navigation » (voir section ci-dessous), les numéros des panneaux étaient soit visibles, soit partiellement ou totalement cachés. Les participants devaient donc se déplacer vers le panneau pour voir le numéro. Bien évidemment, ils devaient accomplir la tâche le plus rapidement possible.

L'espace de navigation

L'espace de navigation devait être assez grand pour permettre aux participants de manipuler le fauteuil aisément. L'expérimentation a ainsi été mise en place dans la grande halle du bâtiment 502 de l'université Paris-Sud (promise à une prochaine démolition et donc vidée de son contenu) illustrée en figure 5.4.



FIGURE 5.4 – La halle expérimentale du FAST qui a servi de terrain d'expérimentation.

5.2.2 Mise en place de l'expérimentation

La mise en place expérimentale était par nature délicate et ambitieuse. La première étape consistait à agencer la halle dans le but d'accueillir l'expérimentation.

Agencement physique

L'espace de la halle utilisé pour l'expérience a été séparé en deux zones distinctes comme suit (voir plan illustré en figure 5.5) :

- La première zone, que nous avons appelée « **zone de navigation** », représentait l'espace réel dans lequel les participants accomplissaient la tâche de navigation, soit directement, soit à distance. D'une dimension de (8 m x 12 m), cette zone contenait les obstacles et les panneaux numérotés.

Nous avons également défini une « **zone de sécurité** » délimitée à l'aide d'un marquage clair au sol. La zone de sécurité représentait l'espace dans lequel les participants avaient le droit de se déplacer avec le fauteuil. Les contours de cette dernière étaient situés à 1m de distance à l'intérieur de ceux de la zone de navigation.

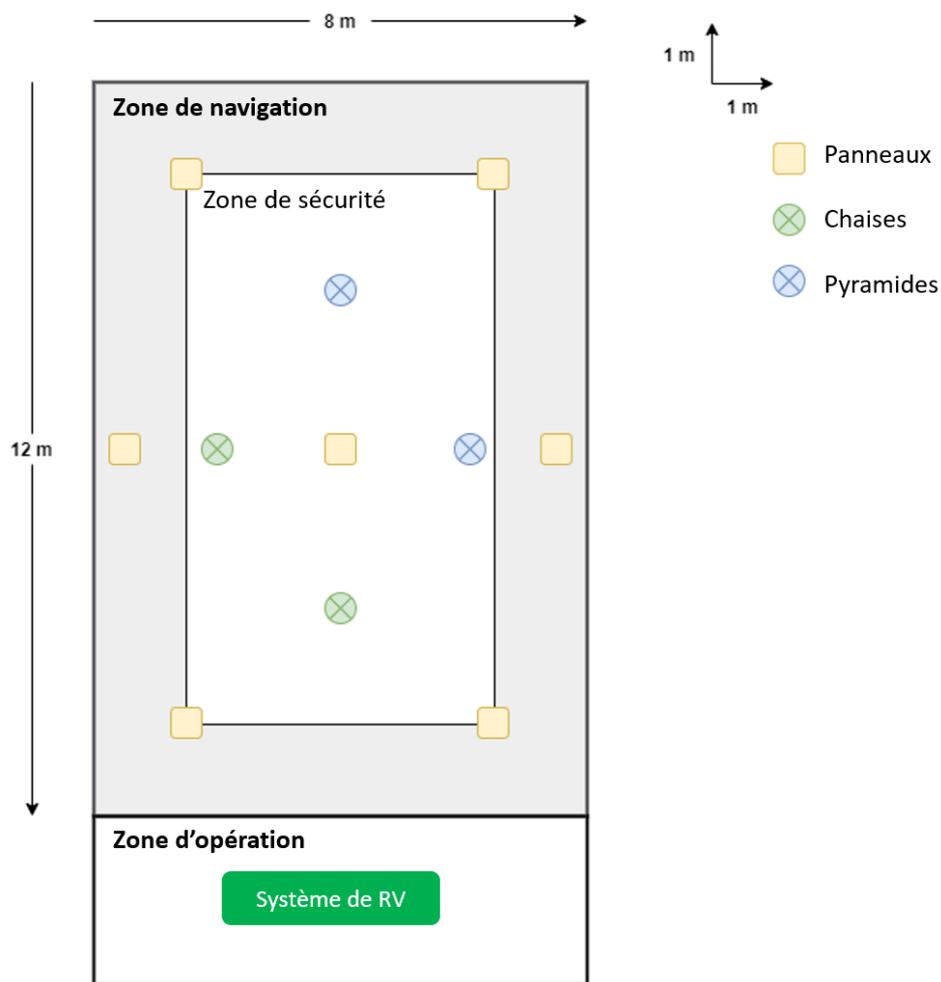


FIGURE 5.5 – Aperçu 2D des deux zones de navigation et d'opération.

- La deuxième zone, que nous avons appelée « **zone d'opération** », contenait l'installation de RV qui permettait aux participants soit de piloter le fauteuil dans la zone de navigation à distance ou d'accomplir la tâche virtuellement dans l'environnement généré par ordinateur.

Les photos de la figure 5.6 illustrent l'agencement des zones. Pour délimiter les contours de la zone de navigation, nous avons installé de grands tissus blanc qui permettaient de réduire les distracteurs éventuels en dehors de l'espace expérimental.

La deuxième étape de la mise en place consistait à installer les composants matériels et logiciels pour chaque environnement. Ces composants peuvent être divisés en composants du **système de restitution visuel**, du **système de restitution audio**, du **système de commande** et du **système de suivi du mouvement**.

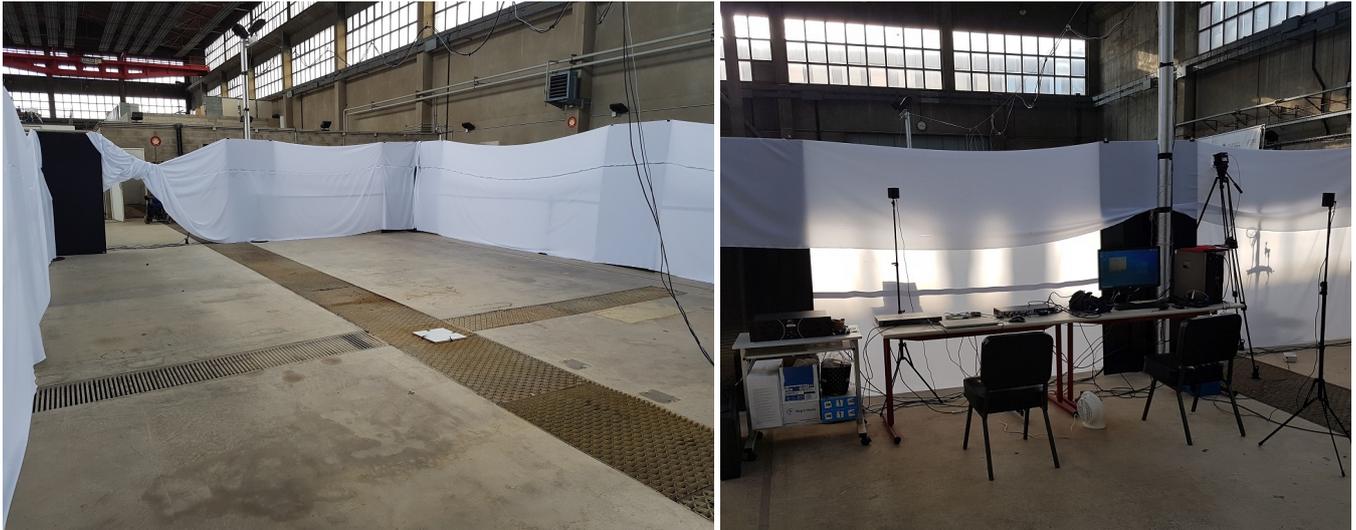


FIGURE 5.6 – Photos illustrant l'agencement de l'espace. Image du haut : vue intérieure (sans les obstacles ni les panneaux de navigation) de la zone de navigation. Image du bas : zone d'opération.

Dispositif visuel

La figure 5.7 montre la vue à la première personne d'un participant dans chaque environnement. Ainsi, dans l'environnement réel, les participants ont fait l'expérience d'une stimulation visuelle naturelle.



FIGURE 5.7 – La vue à la première personne d'un participant. Image de gauche : environnement réel. Image du milieu : environnement distant. Image de droite : environnement virtuel.

Dans l'environnement distant, la capture visuelle a été effectuée à l'aide d'une caméra panoramique Ricoh Theta-V 360°¹ placée au sommet du fauteuil roulant (à hauteur des yeux) et couplée avec un dispositif de restitution individuel : le visiocasque de RV HTC-Vive Pro².

Durant l'expérimentation, les images capturées en temps réel dans l'espace physique de la zone de navigation étaient transmises en continu (à une résolution de 3840 x 1920 et à une fréquence de 30 images par seconde) au moteur de rendu Unity version 2019.1.0f2 (voir annexe A). Ces images étaient alors « texturées » sur une sphère

1. <https://theta360.com/fr/>

2. <https://www.vive.com/fr/product/vive-pro/>

modélisée sur le logiciel de modélisation Blender³, dont les normales étaient inversés⁴. Une caméra virtuelle placée au milieu de la sphère sur Unity permettait ensuite de visualiser la texture dans le visiocasque, offrant un taux de rafraîchissement de 90 Hz.

Dans l'environnement virtuel, nous avons développé dans Unity une scène reproduisant le plus fidèlement possible l'espace physique de la zone de navigation. Afin de créer des conditions similaires à celles de l'environnement distant, la scène générée était capturée en 360° par une caméra virtuelle représentant la position de l'utilisateur. L'image panoramique était alors texturée à l'intérieur d'une sphère avec une caméra dans son centre. La vue de cette deuxième caméra était ensuite restituée à l'intérieur du HTC-Vive Pro. Ce processus nous a permis d'obtenir un rendu similaire dans les deux environnements distant et virtuel.

Pour résumer, concernant l'aspect visuel, la seule différence entre les environnements résidait dans le champ de vision limité à 110° (en raison des contraintes intrinsèques du visiocasque) dans les conditions distante et virtuelle contre un champ de vision naturel dans la condition réelle.

Dispositif audio

Dans l'environnement réel, les participants étaient placés dans des conditions sonores naturelles avec une réverbération modérée due à la grande dimension de la halle.

Afin de reproduire une stimulation auditive similaire dans l'environnement distant, un microphone ambisonique de 1^{er} ordre (microphone Tetramic par CoreSound⁵) placé au sommet du fauteuil électrique a été utilisé pour capturer le son dans la zone de navigation. Concernant la procédure de conversion du son, nous avons reproduit celle de notre première étude. Par conséquent, nous renvoyons le lecteur à la section 3.3.2 du chapitre 3 pour plus de détails techniques.

Dans l'environnement virtuel, les sons ont été générés sur la base d'enregistrements du fauteuil réel dans la zone de navigation, préalablement à l'expérience. Ces enregistrements représentaient les situations où le fauteuil :

- roulait normalement dans la zone (bruit léger de moteur et frottement sur le sol) ;
- faisait une marche arrière (avertisseur strident dissuasif) ;
- touchait un obstacle (bruit de collisions avec une chaise ou une pyramide).

Pour finir, dans les deux situations distante et virtuelle, le son était restitué de manière binaurale dans les écouteurs du visiocasque HTC-Vive Pro.

Dispositif de commande

Dans l'environnement réel, les participants étaient assis dans le fauteuil roulant, lui-même situé dans la zone de navigation. Le fauteuil était commandé directement à l'aide d'un joystick intégré, situé sur son accoudoir droit.

3. <https://blender3d.fr/>

4. Inverser les normales permet d'appliquer la texture à l'intérieur de la sphère.

5. <https://www.core-sound.com/TetraMic/1.php>

Dans les deux environnements distant et virtuel, les participants étaient assis dans un fauteuil muni d'accoudoirs et situé dans la zone d'opération. Afin d'atteindre un niveau maximal de similarité, ce fauteuil était de la même taille que le fauteuil roulant et était équipé d'un joystick quasi-identique placé au même endroit sur son accoudoir droit.

Afin de commander le fauteuil à distance, un protocole série dédié a été conçu sur un ordinateur auquel le joystick était connecté. Quant au contrôle du fauteuil généré par ordinateur dans l'environnement virtuel, un script de navigation a été implémenté sur Unity exploitant son moteur physique intégré.

Dispositif de suivi

Dans la zone de navigation, un système de suivi infrarouge composé d'un réseau de huit caméras ARTTrack5⁶ a été mis en place afin de localiser les marqueurs infrarouges fixés sur le fauteuil pour enregistrer son déplacement. Plusieurs tests ont du être menés pour définir l'emplacement idéal des caméras et obtenir des données de suivi fiables sur l'ensemble de la zone de sécurité. La trajectoire et l'orientation du fauteuil étaient ainsi enregistrées durant l'expérimentation en environnements réel et distant à 60 Hz avec une précision millimétrique.

En ce qui concerne l'environnement virtuel, la trajectoire du fauteuil était enregistrée au sein du logiciel Unity dans son système de coordonnées puis transformées dans le référentiel local correspondant à celui des données réelles (i.e. celui des conditions réelle et distante).

La figure 5.8 montre le fauteuil roulant électrique une fois équipé avec tous les composants. La figure 5.9 illustre les trois environnements réel, distant et virtuel conçus. La mise en place des différents dispositifs était tributaire d'une logistique assez contraignante puisque le fauteuil réel était relié au dispositif de capture et de pilotage par un ensemble complexe de câbles. Un effort considérable a donc été consacré à la mise en place optimale de chaque composant.

5.2.3 Design expérimental de l'expérimentation

L'étude s'est basée sur une conception intra-sujet avec les variables indépendantes suivantes :

1. **La variable « environnement » [ENV].** Cette variable fait référence à l'environnement dans lequel les participants se situent. Elle se divise en trois modalités *RÉEL*, *DISTANT* et *VIRTUEL* qui représentent respectivement la condition dans laquelle :
 - un participant navigue directement dans l'espace physique ;
 - un participant commande le fauteuil roulant à distance ;
 - un participant exécute la tâche de navigation dans l'espace généré par ordinateur.

Cette variable est le facteur principal de cette expérimentation. En outre, la condition *RÉEL* est considéré comme base de référence à laquelle les deux autres conditions sont comparées.

6. <https://ar-tracking.com/products/tracking-systems/arttrack5/>

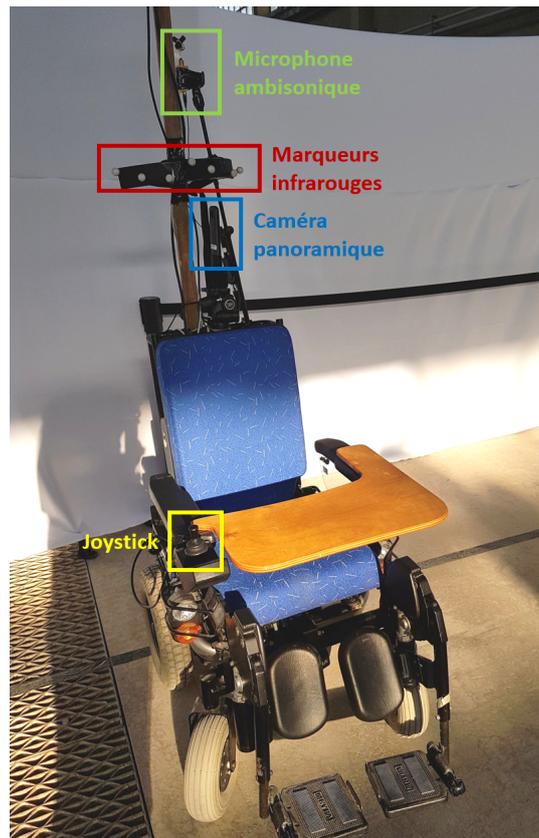


FIGURE 5.8 – Le fauteuil équipé d'un microphone ambisonique, de marqueurs infrarouges, d'une caméra panoramique et d'un joystick.

2. **La variable « chemin » [PATH].** Cette variable fait référence au chemin que les participants doivent suivre lors de la navigation. Elle comprend trois modalités représentant trois chemins différents - mais avec les mêmes caractéristiques géométriques (longueur du chemin, nombre et angle des virages, nombre de fois qu'un obstacle est rencontré, etc.) - qu'emprunte chaque participant indépendamment de l'environnement dans lequel il se situe (voir figure 5.10).

A noter que cette variable a été prise en compte dans le design de l'expérience mais pas lors de l'analyse statistique des résultats. Il s'agissait plutôt de la contrôler pour éviter de biaiser les résultats. Ainsi, pour chacun des trois environnements, les participants empruntaient un chemin différent pour éviter l'effet d'apprentissage.

L'ordre des deux variables a été contrebalancé entre les participants dans le but d'atténuer les éventuels effets d'ordre. On a mis à profit pour cela la méthode du « carré latin »⁷ en ce qui concerne la variable « environnement » [ENV] et la randomisation pour la variable « chemin » [PATH].

7. <https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/latin-square-design/>



FIGURE 5.9 – Aperçu de la vue d'un participant dans les trois environnements. Image du haut : espace physique. Image de gauche : configuration à distance. Image de droite : configuration virtuelle.

5.2.4 Déroulement de l'expérimentation

L'expérimentation a été approuvée par le comité d'éthique et de recherche (CER) de notre université⁸. Des invitations ont alors été envoyées pour venir participer bénévolement à l'expérimentation.

8. <https://www.universite-paris-saclay.fr/recherche/polethis-ethique-et-integrite/comite-dethique-pour-la-recherche>

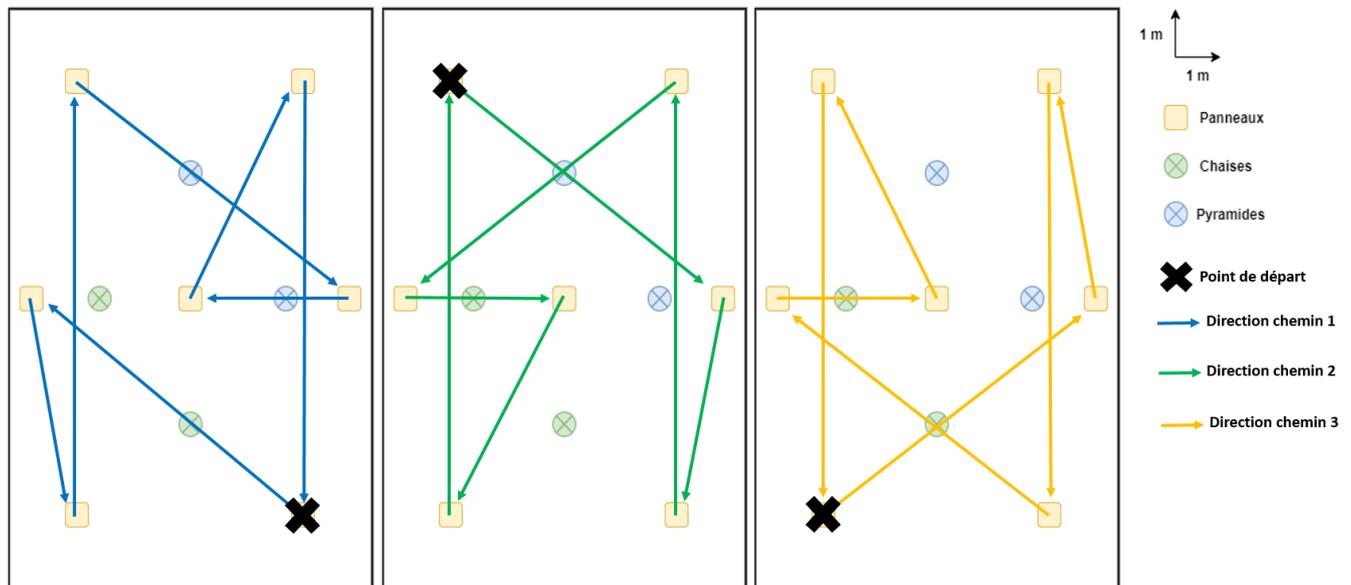


FIGURE 5.10 – Les trois chemins [PATH] empruntés par les participants.

Échantillon

La seule condition pour pouvoir participer était d'avoir une vue et une audition normale ou corrigée. Au total, 27 participants ont pris part à l'expérimentation (18 hommes, 9 femmes), âgés de 21 à 40 ans ($M_{age} = 27.7$ ans, $SD = 5.7$ ans). Parmi eux, 23 étaient droitiers, 3 étaient gauchers et 1 seul était ambidextre. La majorité d'entre eux (19 participants) étaient des étudiants de notre université, tandis que les autres étaient des membres du personnel de notre laboratoire, tous issus de différents domaines scientifiques. En ce qui concerne le niveau d'expérience en RV, 4 participants n'avaient jamais utilisé de visiocasque auparavant et ont déclaré n'avoir aucune expérience en RV, 4 autres ont déclaré être débutants, 15 ont déclaré avoir une expertise intermédiaire et les 4 derniers se sont considérés comme experts en RV.

Procédure d'évaluation

À leur arrivée sur le site de l'expérience, les participants étaient accueillis par un expérimentateur qui les invitait à lire et à signer un formulaire de consentement éclairé contenant des informations générales sur la tâche à accomplir. Ils remplissaient également un formulaire d'informations les concernant (âge, genre, etc.). Une fois cela fait, les participants devaient s'asseoir soit sur le fauteuil roulant électrique situé dans la zone de navigation (condition *RÉEL*), ou sur le fauteuil fixe situé dans la zone d'opération (condition *DISTANT* ou *VIRTUEL*) et dans ce cas là, ils mettaient le visiocasque. Enfin, quelle que soit leur préférence manuelle, les participants posaient leur main droite sur le joystick. L'expérience était divisée en trois étapes comme suit :

- **L'entraînement.** Afin de s'entraîner à la tâche, les participants effectuaient un parcours simple sans obstacle.

Au préalable, l'expérimentateur leur expliquait verbalement comment commander le fauteuil et les invitait à

explorer librement l'environnement. Aucun temps fixe n'a été imposé pendant cette phase d'acclimatation. Tous les participants étaient encouragés à explorer l'espace et à se familiariser avec l'équipement. Lorsqu'ils se sentaient prêts, l'expérimentateur expliquait la tâche à accomplir et donnait quelques règles à respecter, notamment :

- Rester dans la zone de sécurité.
- Terminer le parcours le plus vite possible.
- Éviter de heurter les obstacles.
- Mémoriser l'emplacement des panneaux numérotés.
- **La passation.** Pendant cette phase, les participants devaient terminer le parcours le plus rapidement possible sans heurter d'obstacles tout en mémorisant les numéros des panneaux. La tâche était effectuée une seule fois dans chaque environnement.
- **Les questionnaires.** Une fois la tâche terminée, les participants remplissaient le SP-IE [268] ainsi qu'un test de mémoire portant sur l'emplacement des sept panneaux dans l'environnement (ce nombre a été choisi car il est démontré que la limite de la mémoire de travail est généralement de 7 plus ou moins 2 items [269]).

La durée de l'expérimentation (entraînement, passation et questionnaires) était comprise entre 15 et 20 minutes par environnement [ENV]. Par conséquent, la durée totale de l'expérience était d'environ 1 heure.

Collecte des données

Au total, 81 tests ont été enregistrés : 3 [ENV] x 27 participants. Pour chaque test, le temps d'exécution des tâches, le nombre d'obstacles heurtés et les trajectoires des participants ont été enregistrés. Les réponses au questionnaire de présence et au test de mémoire ont également été recueillies. Par conséquent, l'étude comprenait 11 mesures différentes regroupées comme suit :

Les mesures subjectives. Les réponses au SP-IE basées sur une échelle de Likert à 5 points (1 = « fortement en désaccord », 5 = « fortement en accord ») ont donné des scores pour chacun des six facteurs suivants :

1. PS : présence spatiale perçue.
2. AFF : affordance de l'environnement.
3. AGR : agrément du participant.
4. REAL : degré de réalité attribuée à l'environnement.
5. ATT : attention accordée à la tâche.
6. CYB : mal des simulateurs (cybersickness).

Note : Les réponses correspondant à l'échelle portant sur la présence sociale n'ont pas été collectés pour la simple et bonne raison que les participants étaient seuls dans l'environnement.

Les mesures objectives. Trois mesures de performance ont été enregistrées durant l'expérimentation :

1. MÉMOIRE : le nombre de réponses correctes au test de mémoire.
2. TEMPS : le temps d'achèvement de la tâche.
3. COLLISION : le nombre d'obstacles heurtés.

De plus, deux mesures comportementales ont été extraites de la trajectoire (représentées par des coordonnées X, Y, Z dans l'espace) :

1. DIST : la distance d'évitement des obstacles, c'est-à-dire la distance minimale entre la trajectoire et les obstacles.
2. COURBE : l'abscisse curviligne moyenne au voisinage de chaque obstacle.

La mesure DIST a été calculée - pour chacun des quatre obstacles - comme la distance euclidienne minimale entre le chemin emprunté par le participant et les obstacles. La mesure représente ainsi à quel point un participant s'est approché d'un obstacle [270].

La mesure COURBE (s), quant à elle, a été calculée à chaque point du trajet à l'aide de l'équation donnant l'abscisse curviligne comme : $s = \sqrt{\frac{X^2}{t} + \frac{Z^2}{t}} \times t$, où t représente le temps, et X et Z sont les coordonnées 2D de la position du fauteuil roulant sur un plan horizontal. Les valeurs moyennes de COURBE ont été ensuite calculées autour de chaque obstacle sur une plage fixée à $2 \times$ DIST.

Hypothèses

Nous nous attendions à ce que le type d'environnement [ENV] affecte de manière significative les réponses au questionnaire ainsi que les mesures de performance et de comportement. Plus précisément, nous avons supposé que **l'environnement réel surpasserait les environnements distants et virtuels en termes de présence ressentie et de performance**. En outre, **les résultats subjectifs (réponses au SP-IE) et objectifs (performance et comportement utilisateur) de l'environnement réel devaient être plus proches de ceux de l'environnement distant que de ceux de l'environnement virtuel**. Cette hypothèse repose sur l'idée que, parce que l'environnement distant représente le même espace physique avec les mêmes implications et conséquences, il devrait amener les participants à se comporter de la même manière que s'ils se trouvaient réellement dans cet espace. Inversement, la présence et les mesures comportementales devraient être davantage « perturbées » dans l'environnement virtuel.

Nous avons ainsi émis les hypothèses suivantes :

— **H1 :**

- a. Les échelles PS, AFF, AGR, REAL et ATT seront les plus élevées et l'échelle CYB la plus faible dans la condition *RÉEL*.
- b. Les échelles PS, AFF, AGR, REAL, et ATT seront plus élevées et l'échelle CYB plus faible dans la condition *DISTANT* comparée à la condition *VIRTUEL*.

- **H2 :**
 - a. La mesure MEMOIRE sera la plus élevée dans la condition *RÉEL*.
 - b. La mesure MEMOIRE sera plus élevée dans la condition *DISTANT* comparée à la condition *VIRTUEL*.
- **H3 :**
 - a. La mesure TEMPS sera la plus élevée dans la condition *RÉEL*.
 - b. La mesure TEMPS sera plus élevée dans la condition *DISTANT* comparée à la condition *VIRTUEL*.
- **H4 :**
 - a. La mesure COLLISION sera la plus faible dans la condition *RÉEL*.
 - b. La mesure COLLISION sera plus faible dans la condition *DISTANT* comparée à la condition *VIRTUEL*.
- **H5 :** La mesure DIST dans la condition *RÉEL* sera plus similaire à la condition *DISTANT* qu'à la condition *VIRTUEL*.
- **H6 :** La mesure COURBE dans la condition *RÉEL* sera plus similaire à la condition *DISTANT* qu'à la condition *VIRTUEL*.

5.3 Analyses statistiques et résultats

Dans ce qui suit, les moyennes et les écarts-types sont abrégés respectivement par M et α . L'homogénéité des données a été évaluée à l'aide du test robuste de Levene et Brown-Forsythe modifié (en anglais, « modified robust Brown-Forsythe Levene test »). La normalité des données quant à elle, a été analysée en inspectant visuellement les tracés de QQ normales en combinaison avec des tests de Shapiro-Wilk. Lorsque les données ne suivaient pas une distribution normale, une transformation \log_{10} était appliquée pour essayer de satisfaire le critère de normalité. Si les données n'étaient pas homogènes ou n'étaient pas distribuées normalement après la transformation \log_{10} , les tests paramétriques étaient remplacés par des tests non paramétriques équivalents.

Toutes les analyses ont été effectuées en utilisant le langage R version 3.6.0⁹. Le résultat des tests statistiques paramétriques et non paramétriques pour chaque mesure est rapporté dans la suite de la section. Pour les effets statistiquement significatifs ($p < .05$), l'effet de taille du d de Cohen (en anglais, « Cohen's d effect size ») est calculé avec des valeurs seuils de 0.1 indiquant un effet faible, 0.3 indiquant un effet moyen et 0.5 indiquant un effet fort.

Le reste de cette section est divisé en trois parties. La première décrit l'effet des « environnements » [ENV] sur les échelles subjectives du questionnaire. La deuxième partie décrit l'effet des « environnements » sur les performances objectives et les mesures comportementales. Enfin, la troisième partie présente la corrélation entre les échelles subjectives du questionnaire et les mesures objectives de performance et de comportement.

9. R est un langage de programmation utilisé pour le traitement de données et l'analyse statistique.

5.3.1 Effet des environnements sur le questionnaire subjectif SP-IE

La figure 5.11 illustre les boîtes à moustaches du score moyen de chaque échelle (voir également le tableau 5.1). Le calcul de ces moyennes a montré que les échelles PS, AFF, AGR, REAL et ATT avaient des scores plus élevés tandis que l'échelle CYB enregistrait un score plus faible en condition *RÉEL*. En outre, la moyenne PS était très élevée en termes absolus (> 4.5).

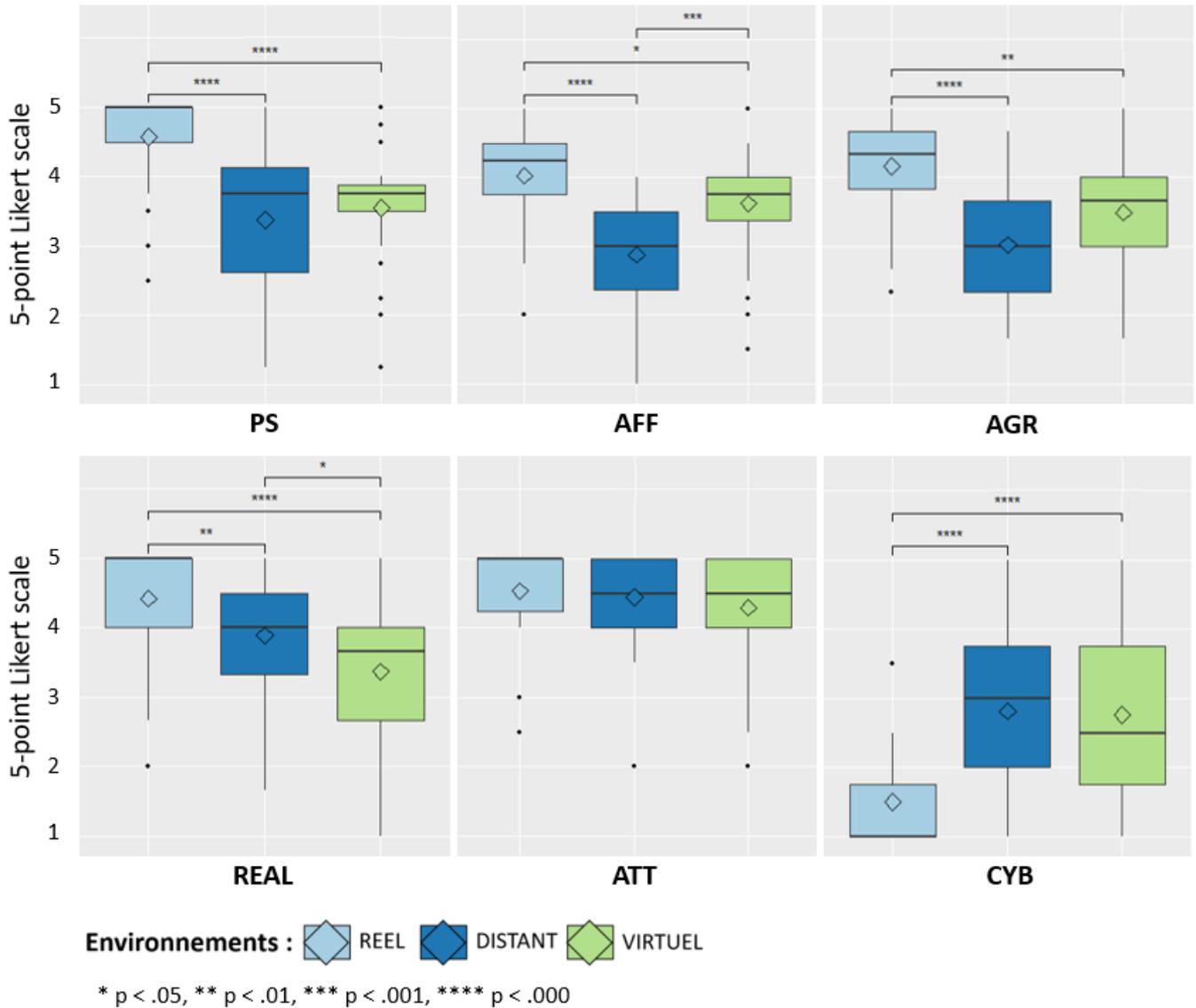


FIGURE 5.11 – Effet des environnements [ENV] sur les échelles du SP-IE. Le diamant, la ligne en travers de la boîte et les points représentent respectivement la moyenne, la médiane et les valeurs aberrantes.

Un test de normalité de Shapiro-Wilk a indiqué que les scores des échelles n'étaient pas normalement distribués (PS : $W = 0.91$; $p < .000$, AFF : $W = 0.95$; $p < .005$, AGR : $W = 0.95$; $p < .005$, REAL : $W = 0.91$; $p < .000$, ATT : $W = 0.76$; $p < .000$, CYB : $W = 0.90$; $p < .000$). Nous avons alors effectué un test de Friedman pour comparer les scores moyens dans les trois environnements. Les résultats ont montré une différence significative pour toutes les

TABLE 5.1 – Effet des environnements [ENV] sur les échelles du SP-IE : moyennes (M) et écart-types (α).

Échelles	RÉEL	DISTANT	VIRTUEL
PS	$M = 4.57 (\alpha = 0.69)$	$M = 3.38 (\alpha = 1.04)$	$M = 3.55 (\alpha = 0.87)$
AFF	$M = 4.03 (\alpha = 0.74)$	$M = 2.88 (\alpha = 0.79)$	$M = 3.62 (\alpha = 0.83)$
AGR	$M = 4.16 (\alpha = 0.7)$	$M = 3.02 (\alpha = 0.88)$	$M = 3.49 (\alpha = 0.87)$
ATT	$M = 4.53 (\alpha = 0.72)$	$M = 4.44 (\alpha = 0.72)$	$M = 4.3 (\alpha = 0.83)$
REAL	$M = 4.42 (\alpha = 0.84)$	$M = 3.89 (\alpha = 0.82)$	$M = 3.37 (\alpha = 1.01)$
NEG	$M = 1.5 (\alpha = 0.68)$	$M = 2.81 (\alpha = 1.17)$	$M = 2.76 (\alpha = 1.16)$

échelles sauf ATT :

- SP : $\chi^2(2) = 29.36, p < .000$.
- AFF : $\chi^2(2) = 27.43, p < .000$.
- AGR : $\chi^2(2) = 23.77, p < .000$.
- REAL : $\chi^2(2) = 28.06, p < .000$.
- ATT : $\chi^2(2) = 2.06, p = 0.36$.
- CYB : $\chi^2(2) = 21.08, p < .000$.

Suite à cela, des tests de Wilcoxon Signed-Rank avec correction de continuité ont été effectués entre chaque environnement. Les résultats (présentés dans le tableau 5.2) ont montré que la condition *RÉEL* surpassait les deux conditions *DISTANT* et *VIRTUEL* dans toutes les échelles **soutenant l'hypothèse H1(a)**. En revanche, nous avons obtenu des résultats plus contrastés entre les conditions *DISTANT* et *VIRTUEL* : la condition *VIRTUEL* a obtenu un score significativement plus élevé sur les échelles AFF et AGR tandis que la condition *DISTANT* a obtenu un meilleur score sur l'échelle REAL. Par contre, aucune différence significative entre les deux conditions sur les échelles SP et CYB n'a été constatée. On ne peut donc **ni confirmer ni rejeter l'hypothèse H1(b)**.

TABLE 5.2 – Résultats des tests de Wilcoxon Signed-Rank sur les six échelles du questionnaire. Les résultats statistiquement significatifs sont colorés en vert.

Échelles	RÉEL vs. DISTANT	RÉEL vs. VIRTUEL	DISTANT vs. VIRTUEL
PS	V = 348 ; p < .000 ; r = 1.35	V = 288 ; p < .000 ; r = 1.31	V = 123 ; p = .46
AFF	V = 345 ; p < .000 ; r = 1.49	V = 195 ; p < .05 ; r = 0.52	V = 23 ; p < .000 ; r = 0.91
AMU	V = 253 ; p < .000 ; r = 1.43	V = 226 ; p < .01 ; r = 0.84	V = 62 ; p < .05 ; r = 0.53
REAL	V = 216 ; p < .000 ; r = 0.64	V = 294 ; p < .000 ; r = 1.13	V = 259 ; p < .01 ; r = 0.56
CYB	V = 9 ; p < .000 ; r = 1.37	V = 12 ; p < .000 ; r = 1.31	V = 156 ; p = .86

5.3.2 Effet des environnements sur les mesures objectives

Mesures de performance

La figure 5.12 montre les valeurs moyennes des mesures de performance.

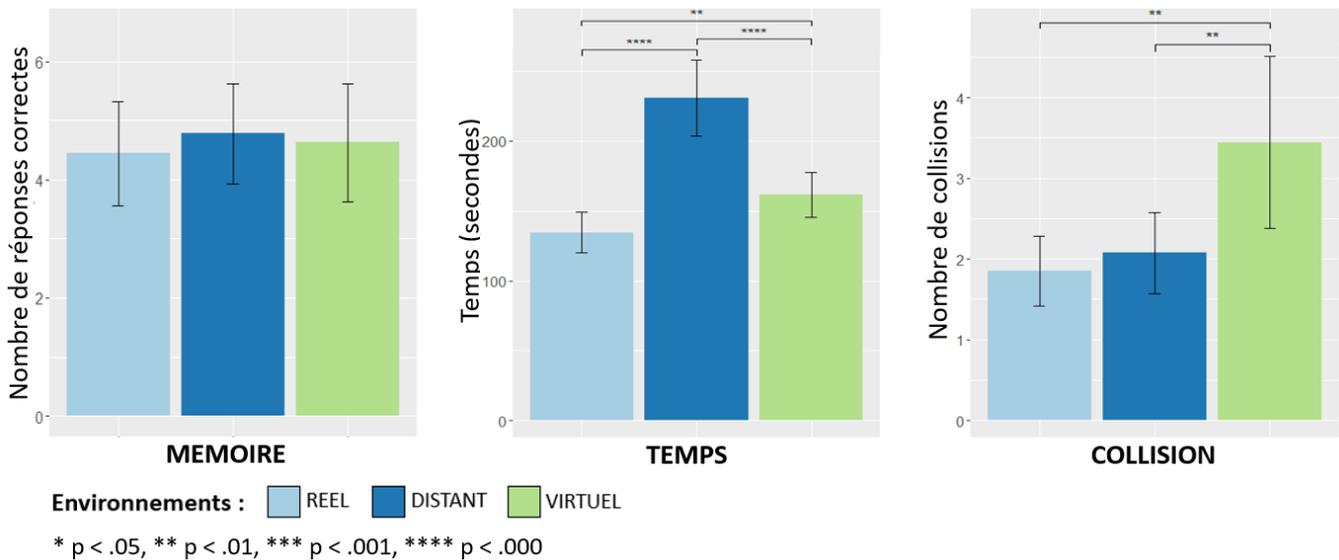


FIGURE 5.12 – Effet des environnements [ENV] sur les mesures de performance. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance.

On peut voir que les scores moyens de la mesure MÉMOIRE dans les trois environnements est approximativement similaire (environ 4.5 réponses correctes sur 7). Un test Shapiro-Wilk de normalité a indiqué que les données n'étaient pas normalement distribuées ($W = 0.85$; $p < .000$). Un test de Friedman a alors été effectué entre les trois environnements qui n'a effectivement montré aucune différence entre les environnements ($\chi^2(2) = 1.33$, $p = 0.52$).

Pour aller plus loin, nous avons également calculé le score moyen de la mesure MÉMOIRE dans le cas de la première condition uniquement (c'est-à-dire le premier environnement auquel les participants étaient confrontés). Comme l'ordre des environnements était contrebalancé, la première condition faisait référence tantôt à l'environnement RÉEL, tantôt au DISTANT, ou au VIRTUEL. Les scores moyens ainsi calculés étaient également similaires entre les environnements avec une légère baisse (moyenne de 4 réponses correctes sur 7). De même, le test de Friedman n'a donné aucun résultat significatif. Ainsi, **H2(a) et H2(b) ont été rejetées.**

En ce qui concerne la mesure de TEMPS, la valeur moyenne de chaque environnement était $M_{REEL} = 134.62$ s ($\alpha_{REEL} = 36.9$ s), $M_{DISTANT} = 230.77$ s ($\alpha_{DISTANT} = 69.12$ s), $M_{VIRTUEL} = 161.59$ s ($\alpha_{VIRTUEL} = 40.65$ s). Une transformation \log_{10} appliquée sur les valeurs moyennes a permis d'obtenir une distribution suivant une loi normale ($W = 0.98$; $p = 0.35$). Le critère d'homogénéité étant également satisfait ($t = 0.39$, $p = 0.99$), une ANOVA à sens unique (en anglais, « One-way Analysis of Variances ») a été effectuée qui a montré une différence statistiquement significative entre les trois environnements ($F(2, 52) = 48.35$, $p < .000$).

Par conséquent, des tests de Student (t-test) dépendants ont été effectués avec une correction de Bonferroni pour comparer les conditions entre elles. Les résultats de ces tests ont indiqué une différence statistiquement significative entre les conditions *RÉEL* et *DISTANT* ($t(26) = -8.89$, $p < .000$, $r = 1.81$) et les conditions *RÉEL* et *VIRTUEL* ($t(26) = -3.7$, $p < .01$, $r = 0.73$), la condition *RÉEL* surpassant les deux autres conditions et **soutenant ainsi H3(a)**. De plus, une différence significative a été constatée entre les conditions *DISTANT* et *VIRTUEL* ($t(26) = 6.48$, $p < .000$, $r = 1.23$) avec cependant un meilleur score pour la condition *VIRTUEL* ce qui va **à l'encontre de l'hypothèse H3(b)**.

Pour finir, nous avons calculé les valeurs moyennes de la mesure COLLISION pour chaque environnement : $M_{REEL} = 1.85$ collisions ($\alpha_{REEL} = 1.1$ collisions), $M_{DISTANT} = 2.07$ collisions ($\alpha_{DISTANT} = 1.27$ collisions), $M_{VIRTUEL} = 3.44$ collisions ($\alpha_{VIRTUEL} = 2.69$ collisions). Un test de Shapiro-Wilk a indiqué que les données n'étaient pas distribuées normalement, même après application d'une transformation \log_{10} ($W = 0.84$, $p < .000$). On a donc utilisé un test de Friedman qui a montré une différence statistiquement significative entre les environnements ($\chi^2(2) = 7.98$, $p < 0,05$).

Des tests de Wilcoxon dépendants ont alors été réalisés qui ont montré des différences entre les conditions *RÉEL* et *VIRTUEL* ($V = 64$; $p < .01$; $r = 0.77$) mais aucune différence significative entre les conditions *RÉEL* et *DISTANT* ($V = 66$; $p = 0.4$). Par conséquent, **l'hypothèse H4(a) n'a pas pu être validée**. D'un autre côté, les résultats ont montré une différence statistiquement significative entre les conditions *DISTANT* et *VIRTUEL* ($V = 42$; $p < .01$; $r = 0.65$), avec la condition *DISTANT* surpassant *VIRTUEL* ce qui **soutient l'hypothèse H4(b)**.

Mesures comportementales

Aucun résultat significatif concernant la mesure COURBE n'a été trouvé (**H6 non validée**). Pour cette raison, il n'en est pas fait état dans ce qui suit.

Concernant la mesure DIST (voir figure 5.13), les valeurs moyennes étaient respectivement $M_{REEL} = 0.78$ m ($\alpha_{REEL} = 0.12$ m), $M_{DISTANT} = 0.78$ m ($\alpha_{DISTANT} = 0.16$ m), $M_{VIRTUEL} = 0.71$ m ($\alpha_{VIRTUEL} = 0.11$ m). Les données étaient normalement distribuées ($W = 0.98$; $p = 0.31$) et homogènes ($t = 0.73$, $p = 0.81$). Par conséquent, une ANOVA à sens unique a été effectuée qui a montré une différence statistiquement significative entre les environnements ($F(2, 52) = 3.02$, $p < .05$).

Ensuite, des tests de Student (t-test) dépendants avec correction de Bonferroni ont été effectués. Ces derniers ont montré une différence significative entre les conditions *RÉEL* et *VIRTUEL* ($t(26) = 2.41$, $p < .05$, $r = 0.58$) alors qu'aucun résultat significatif n'a été trouvé entre les conditions *RÉEL* et *DISTANT* ($t(26) = -0.17$, $p = 0.87$). Ces résultats sont **conformes à H5**. Par contre, aucune différence significative n'a également été constatée entre les conditions *DISTANT* et *VIRTUEL* ($t(26) = 1.7$, $p = 0.1$).

La tableau 5.3 présente un récapitulatif du résultat (confirmée / infirmée / pas de décision) de chaque hypothèse.

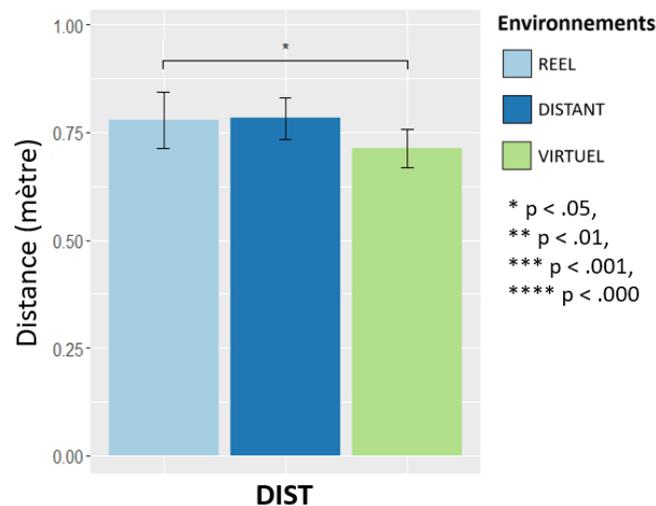


FIGURE 5.13 – Effet des environnements [ENV] sur la mesure de comportement. La barre d'erreur indique l'intervalle de confiance.

TABLE 5.3 – Tableau récapitulatif du résultat des hypothèses.

Hypothèses	Résultats
H1(a)	Confirmée
H1(b)	Pas de décision
H2(a)	Infirmée
H2(b)	Infirmée
H3(a)	Confirmée
H3(b)	Infirmée
H4(a)	Pas de décision
H4(b)	Confirmée
H5	Confirmée
H6	Infirmée

5.3.3 Corrélation entre les échelles subjectives de SP-IE et les mesures objectives de performance et de comportement

Afin d'étudier la relation entre les différentes mesures de l'étude, des tests de corrélation Pearson ont été effectués entre les échelles PS, AFF, REAL, AGR, ATT et CYB du questionnaire et les mesures de performance à savoir MÉMOIRE, TEMPS et COLLISION ainsi qu'avec la métrique comportementale DIST. Le tableau 5.4 met en évidence les corrélations significatives.

Ainsi, en ce qui concerne les mesures de performance, les échelles du questionnaire étaient significativement corrélées avec les variables MÉMOIRE (sauf l'échelle REAL), TEMPS (sauf l'échelle AFF) et COLLISION (sauf les échelles AFF et ATT). En ce qui concerne la métrique DIST, une corrélation significative a été trouvée avec l'échelle REAL uniquement.

TABLE 5.4 – Corrélations Pearson entre les échelles du questionnaire et les mesures objective (no = aucune corrélation). Les corrélations > 0.3 sont colorées en vert.

Échelles	MÉMOIRE	TEMPS	COLLISION	DIST
PS	0.25 (p <.05)	-0.42 (p <.000)	-0.23 (p <.05)	no
AFF	0.31 (p <.01)	-0.49 (p <.000)	no	no
REAL	no	-0.22 (p <.05)	-0.26 (p <.05)	0.24 (p <.05)
AGR	0.29 (p <.01)	-0.33 (p <.01)	-0.22 (p <.05)	no
ATT	0.24 (p <.05)	no	no	no
CYB	0.27 (p <.01)	0.28 (p <.01)	0.27 (p <.01)	no

5.4 Discussion

L'analyse comparative entre les environnements réel, distant et virtuel a été réalisée sur les six échelles du questionnaire SP-IE (présence spatiale, affordance de l'environnement, degré de réalité attribuée à l'environnement, agrément des utilisateurs, attention accordée à la tâche et cybersickness) ainsi que sur les trois mesures objectives de performance (test de mémoire, temps d'exécution de la tâche et nombre de collisions) et l'indicateur comportemental défini comme la distance minimale d'évitement des obstacles.

5.4.1 Réponses subjectives au questionnaire SP-IE

Un environnement réel est par définition l'espace naturel dans lequel les gens évoluent et avec lequel ils interagissent dans leur vie quotidienne. Dans cette étude, l'environnement réel a tout logiquement enregistré le meilleur score en ce qui concerne le niveau d'affordance. Par ailleurs, contrairement à ce qui avait été supposé, l'environnement distant a été classé comme offrant le niveau d'affordance le plus faible. Cela pourrait s'expliquer par les attentes des participants concernant leur incarnation (dans leur corps) qui étaient plus élevées dans l'environnement distant. Nombre d'entre eux ont ainsi déclaré après l'évaluation que le fait de ne pas se voir dans le fauteuil roulant à distance était très perturbant alors que l'absence d'avatar dans l'environnement virtuel était moins gênante (voir figure 5.7). Ces attentes ont pu fortement influencer la relation entre le corps des participants et l'environnement sur laquelle repose l'affordance [171]. Cela souligne **l'importance de l'utilisation d'avatars** dans les études futures [251].

Le faible niveau d'affordance dans la condition à distance pourrait aussi être dû aux secousses du vrai fauteuil roulant (produites par la friction avec le sol). Ces secousses bien que faibles étaient visuellement reflétées dans le visocasque sans être ressenties physiquement par les participants. Cette différence entre ce qui était perçu et ce qui était vécu pourrait avoir eu une incidence considérable sur l'affordance. Il serait ainsi intéressant d'intégrer des

stimulus haptiques lors de prochaines études pour éviter ce genre de biais.

Comme pour l'affordance, l'agrément a été jugé le meilleur dans l'environnement réel et le moins bon dans l'environnement distant. Des entretiens informels avec certains participants ont montré leur grand enthousiasme lorsqu'ils conduisaient le fauteuil roulant en situation réelle en raison de la nature « *bizarre mais drôle* » de l'expérience¹⁰. Dans l'environnement distant, cette sensation d'amusement a été réduite en raison d'une certaine réticence à commander le fauteuil roulant à distance avec un tel système de téléopération. En outre, cette configuration a eu tendance à **réduire la confiance des participants dans le contrôle du fauteuil** : beaucoup d'entre eux avaient plus peur de casser quelque chose dans la situation à distance qu'en conduite directe. En ce sens, notre désir de mettre en exergue la conscience des conséquences des actions en téléprésence a peut-être été exaucé au-delà de nos espérances.

En ce qui concerne le degré d'attention accordé à la tâche, aucune différence n'a été constatée entre les trois environnements, ce qui peut s'expliquer par la similitude de la tâche et du contenu dans tous les environnements.

Le niveau de cybersickness quant à lui était - sans surprise - nettement plus faible dans l'environnement réel que dans les autres environnements où il était par contre, quasiment similaire. L'absence de différence entre les environnements distant et virtuel reflète la similarité du système de RV utilisé (rendus visuel et audio proches et même métaphore de navigation). De plus, le score de cybersickness attribué aux deux environnements en termes absolus était moyen (2.7 points contre 1.6 points en condition réel), ce qui illustre la capacité des participants à accomplir la tâche dans de bonnes conditions générales et souligne l'amélioration de la qualité des systèmes virtuels et de téléopération. En outre, ces résultats démontrent l'importance de s'appuyer **sur des interfaces utilisateur similaires lors de la comparaison entre différents environnements**.

En ce qui concerne le degré de réalité, les participants ont attribué le degré le plus élevé à l'environnement réel et le degré le plus faible à l'environnement virtuel ce qui soutient notre hypothèse. On s'attendait en effet à ce que l'environnement distant soit jugé plus réel par rapport à l'environnement virtuel en raison de l'existence physique de l'espace. Ainsi, même si les environnements distant et virtuel s'appuyaient sur la même interface utilisateur pour médiatiser l'espace d'action, la conscience qu'avaient les participants de l'existence physique de cet espace dans la condition distante les a probablement amenés à lui attribuer un degré de réalité plus élevé.

Plus important, la sensation de présence spatiale a été jugée la plus élevée dans l'environnement réel par rapport aux environnements distant et virtuel. Ce résultat est en accord avec de nombreuses études qui ont comparé des environnements réels et virtuels. Toutefois, il va à l'encontre des résultats de notre précédente étude (décrite dans le chapitre 3) selon lesquels les participants éprouvaient une sensation d'hyper-présence dans l'environnement distant [226]. Cela pourrait être dû à **la nature dynamique de la tâche de navigation** dans la présente étude qui a entraîné une différence de perception significative entre les environnements. Nous pensons en particulier aux stimulus haptiques ressentis uniquement dans la condition réelle alors que dans l'étude précédente, la perception

10. Il à noter qu'aucun d'entre eux n'utilisait de fauteuil roulant dans son quotidien.

des deux environnements était relativement proche car les participants utilisaient uniquement les stimuli visuel et audio.

Plus surprenant, alors qu'on s'attendait à ce que l'environnement distant induise une sensation de présence spatiale plus élevée que l'environnement virtuel, aucune différence significative n'a été constatée entre les deux environnements. Ce résultat peut s'expliquer en partie par l'influence positive des facteurs d'affordance et d'agrément - mieux notés dans l'environnement virtuel - sur la sensation de présence des participants. En d'autres termes, l'influence de l'existence physique de l'espace représenté par le degré de réalité telle que théorisée plus haut, n'a pas suffi à faire pencher la balance en faveur de l'environnement distant. Des études supplémentaires sont néanmoins nécessaires pour confirmer ou infirmer cette hypothèse.

5.4.2 Performance et comportement utilisateur

Des résultats objectifs sur la base d'indicateurs de performance et de comportement ont également été analysés.

Du côté du score de mémoire, on s'attendait à ce que l'environnement réel enregistre une meilleure performance en raison de son niveau d'immersion plus élevé (champ de vision plus large et son naturel) [271]. Pourtant, aucune différence n'a été constatée entre les trois environnements. Ce résultat peut être lié au degré d'attention similaire dans les trois environnements : les participants se sont concentrés de manière équivalente quel que soit l'environnement, stimulant ainsi leur mémoire au même niveau.

Le temps moyen d'exécution de la tâche quant à lui, a révélé que les participants étaient plus rapides dans l'environnement réel, ce qui est sûrement en partie dû au niveau d'immersion plus élevé dans cette condition [223]. En revanche, les participants étaient plus lents dans l'environnement distant que dans le virtuel, ce qui va à l'encontre de ce qui avait été supposé. L'explication la plus probable est que les participants ont fait très attention à **ne rien casser** dans l'espace physique lors de la navigation à distance avec le vrai fauteuil roulant, ce qui a eu pour incidence de réduire considérablement leur vitesse.

Cette hypothèse est étayée par le nombre de collisions observées qui était plus faible dans les environnements réel et distant que dans l'environnement virtuel. Aussi, aucune différence en termes de collisions n'a été constatée entre les deux environnements réel et distant. Par conséquent, les participants ont fait **plus attention à ne pas heurter d'obstacles lorsque l'espace existait, indépendamment du fait d'être physiquement dans cet espace ou à distance**.

Ceci tend également à être confirmé par l'indicateur comportemental extrait de la trajectoire du fauteuil roulant : la valeur de la distance minimale d'évitement était la plus élevée (et presque similaire) dans les environnements réel et distant en comparaison à l'environnement virtuel. Cela suggère que les participants étaient moins prudents lorsque l'espace était généré par ordinateur, étant conscients que leurs actions n'auraient pas de conséquences sur le monde réel [142]. Ces résultats mettent clairement en évidence l'**influence de l'existence de l'espace dans lequel les participants se trouvent (physiquement ou à distance) sur leurs performances et comportements**.

Pour résumer les résultats de l'analyse comparative, l'environnement réel a obtenu un meilleur score en comparaison avec les deux environnements distant et virtuel, sauf en ce qui concerne le degré d'attention et la mémoire où aucune différence n'a été constatée.

Les résultats sont plus mitigés lorsque l'on compare les environnements distant et virtuel. En ce qui concerne les mesures subjectives issues du questionnaire, aucune différence dans la sensation de présence n'a été constatée. En revanche, un degré de réalité plus élevé a été, comme prévu, attribué à l'environnement distant. D'un autre côté, un niveau plus élevé d'affordance et d'agrément a été attribué à l'environnement virtuel. Concernant les performances, les participants ont montré un temps d'exécution plus court dans l'environnement virtuel mais un taux de collision plus faible dans l'environnement distant. Enfin, l'indicateur comportemental représenté par la distance minimale d'évitement a mis en évidence que le comportement des participants dans l'environnement réel était plus proche de leur comportement dans l'environnement distant que dans l'environnement virtuel.

5.4.3 Corrélation entre les résultats subjectifs et objectifs

La question des corrélations existantes entre la présence spatiale et les mesures de performance et de comportement a beaucoup été soulevée dans la littérature (voir chapitre 1, section 1.5.3). Pour tenter de répondre à cette question, les corrélations entre les échelles subjectives du SP-IE et les mesures objectives enregistrées durant l'expérience ont été calculées.

Une corrélation positive a ainsi été trouvée entre l'évaluation subjective de la présence spatiale et les mesures de performance en particulier le temps d'exécution de la tâche. En d'autres termes, plus les participants se sentaient présents dans l'environnement, plus ils se souvenaient de l'espace, plus ils étaient rapides et moins ils heurtaient d'obstacles. Ce résultat fait écho à des études récentes qui tendent à affirmer que la présence et la performance sont liées [3, 116]. En revanche, aucune corrélation n'a été trouvée avec l'indicateur comportemental de distance d'évitement.

Comme pour le degré de présence spatiale, l'agrément des participants était positivement corrélé à toutes les mesures de performance avec notamment une forte corrélation pour le temps d'exécution. Cela suggère une influence positive de l'agrément et de la satisfaction des utilisateurs sur leur performance [272].

En revanche, le degré d'attention n'était que faiblement et uniquement corrélé avec les scores de mémoire. Cette corrélation tend à indiquer que plus les participants accordaient d'attention à la tâche pendant l'expérience, mieux ils se souvenaient après des caractéristiques de l'environnement (dans le cas présent, l'emplacement des panneaux numérotés).

Le degré d'affordance quant à lui, était fortement corrélé à la fois avec le score de mémoire et le temps d'exécution. L'affordance fait référence à la possibilité d'agir dans l'environnement conformément aux attentes d'un utilisateur [171]. Il semble donc logique qu'un environnement offrant une meilleure affordance entraîne de meilleures performances. Cependant, l'affordance n'était pas corrélée avec le nombre de collisions. Ces résultats apparemment

contradictoires appellent à des évaluations supplémentaires pour mieux comprendre la relation entre l'affordance et les mesures de performance.

Plus important encore, des corrélations bien que faibles ont été trouvées entre le degré de réalité attribuée aux environnements et le temps d'exécution de la tâche ainsi que le nombre de collisions et la distance d'évitement. Ainsi, plus les participants étaient conscients de la réalité de l'espace, plus ils étaient prudents, gardant plus de distance entre eux et les obstacles afin de les éviter. Cette corrélation met en évidence **une différence de perception entre les environnements distants et virtuels** et l'impact de cette différence sur les performances et le comportement des utilisateurs.

Pour finir, il a été constaté qu'un degré plus élevé de cybersickness était faiblement corrélé à un temps d'exécution des tâches plus long et à un plus grand nombre de collisions. A l'opposé, le degré de cybersickness était positivement corrélé avec les scores de mémoire. Cela pourrait s'expliquer notamment par le fait qu'un temps plus long passé dans un environnement pour accomplir la tâche permet aux participants de mieux se souvenir des détails de l'espace, même si le temps passé dans cet espace est moins agréable. On peut supposer que le mal du simulateur est resté très supportable dans les conditions expérimentales mises en oeuvre (sujet assis, expérience rapide et engageante).

Prises ensemble, ces corrélations donnent des résultats prometteurs sur l'utilisation d'outils plus objectifs tels que les mesures de performance et de comportement en combinaison avec des questionnaires plus subjectifs mais simple d'utilisation.

5.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude qui compare l'exécution d'une tâche de navigation dans un espace physique (environnement réel) avec la même tâche effectuée dans un environnement distant et virtuel représentant respectivement une configuration distante et une représentation virtuelle du même espace physique. Les participants à l'expérience devaient conduire un fauteuil roulant pour parcourir un circuit où divers obstacles avaient été placés. L'objectif principal de l'étude était d'évaluer la sensation de présence spatiale et ses facteurs intrinsèques (mesurés par le SP-IE [268]) dans les trois environnements. De plus, des mesures objectives étaient enregistrées durant l'expérience afin de les comparer avec le degré de présence spatiale ressenti par les participants. Ces mesures étaient basées sur la performance des participants à se souvenir des détails de l'espace, à accomplir la tâche le plus vite possible et à éviter les obstacles ainsi que sur certains traits de leur comportement extraits à partir de leurs trajectoires à savoir, la distance d'évitement des obstacles.

En résumé, les résultats du questionnaire ont indiqué une sensation de présence spatiale plus élevée dans l'environnement réel tandis qu'aucune différence n'a été constatée entre l'environnement distant et l'environnement virtuel. Les mesures de performance (temps plus court et moins de collisions) ont confirmé que **l'environnement**

réel constituait une base de référence solide. Le nombre de collisions s'est avéré inférieur dans l'environnement distant par rapport à l'environnement virtuel. Ce résultat indique une plus grande prudence des participants à ne pas heurter d'obstacles lorsque l'espace est perçu comme réel, qu'ils se trouvent directement dans cet espace ou à distance via un système de RV. Cette hypothèse est soutenue par une plus grande distance d'évitement dans les deux environnements réel et distant par rapport à l'environnement virtuel. Cela met ainsi en évidence **une plus grande similitude du comportement des participants dans l'environnement réel et l'environnement distant comparé à leur comportement en environnement virtuel.**

Le second objectif de cette étude était d'évaluer les corrélations entre les réponses subjectives et objectives. Des corrélations positives ont été trouvées entre la présence spatiale et les mesures de performance. Ces résultats sont prometteurs en ce qui concerne la fiabilité des outils de performance pour évaluer la présence tout en encourageant l'utilisation de plusieurs types de mesures complémentaires.

Il convient également de souligner les corrélations qui ont été trouvées entre l'échelle de réalité du questionnaire et deux des trois mesures de performance ainsi qu'avec la mesure comportementale. Comme l'échelle de réalité était plus élevée dans les environnements réel et distant, on peut supposer que l'existence physique de l'espace dans lequel se trouvaient les participants pourrait les avoir amenés à être plus prudents et donc, pourrait avoir influencé leurs performances et leur comportement. Si d'autres études sont nécessaires pour confirmer ces conclusions, ces résultats fournissent des preuves solides **des différences existantes entre la perception des environnements distants et virtuels** et incitent à d'autres comparaisons entre eux.

Cette étude a donné lieu à une publication [273]. Par ces travaux, nous espérons avoir mis en lumière l'importance des environnements distants dans la compréhension de la présence spatiale et de ses facteurs mais aussi dans la recherche de nouvelles mesures basées sur la performance et surtout, sur le comportement de l'utilisateur.

Répercussion sur le modèle de présence spatiale

Concernant l'amélioration de notre modèle, l'étude a souligné certains critères que ce dernier doit respecter, à savoir :

- Illustrer la relation entre le degré de réalité attribuée à l'environnement et la conscience des utilisateurs de l'existence du lieu physique et de l'impact de leurs actions sur ce lieu. Cela permettrait notamment de différencier entre les environnements distants et virtuels. En d'autres termes, cela augmenterait le niveau de sensibilité du modèle aux différents types d'environnements existants (réel, distant, mixte et virtuel).
- Prendre en compte l'importance des avatars (et de leur fidélité de représentation) dans la construction mentale du soi et des autres dans l'environnement et par conséquent, dans l'émergence de la présence de soi et de la présence sociale. Sans oublier de mettre en évidence l'influence de ces formes sur la présence spatiale.

Dans le prochain et dernier chapitre, nous proposerons une version révisée de notre modèle en nous basant sur les réflexions et les constatations issues des deux études expérimentales (voir sections 3.6 et 5.5) et de l'analyse factorielle du questionnaire (voir section 4.6).

English Summary

This chapter presents a user experiment that compares the execution of a task in three environments : **a real physical space, a remote configuration of the real space via a teleoperation system, and a virtual simulation of the same physical space.**

Thus, following a within-subject design, 27 participants performed a navigation task consisting in following a path route using an electrical wheelchair while avoiding obstacles and remembering details from the space.

The main objective of the study was to evaluate spatial presence and its intrinsic factors (affordance, enjoyment, attention, reality, and cybersickness) as measured by the SP-IE questionnaire. In addition, performance measures were gathered regarding environment recollection, task completion time, and obstacle collision. The evaluation also included a behavioral metric measured by obstacle avoidance distance extracted from participants' trajectories.

Results indicated a higher spatial presence in the real environment, along with the best performance (shorter time and fewer collisions). This confirmed that the real environment provided a solid baseline. In contrast, no difference was found in spatial presence between the remote and the virtual conditions, although a higher degree of affordance and enjoyment was attributed to the virtual environment, and a higher degree of reality was attributed to the remote environment.

The number of collisions was found to be lower in both real and remote environments compared to the virtual

one. Similarly, the avoidance distance was also bigger (and almost similar) in the real and the remote conditions indicating a greater caution of participants to avoid hitting obstacles when space was perceived as real, **whether they are directly in the space or remotely located via a teleoperation system.** These cues highlight that the behavior of participants in the real condition was closer to their behavior in the remote situation than it was in the virtual condition.

The second objective of this study was to evaluate the correlations between the subjective responses to the questionnaire and the objective measures. Strong correlations were found between spatial presence and performance measures, which encourage the use of several types of complementary measures to assess spatial presence.

Furthermore, positive correlations were found between the reality scale of the questionnaire and two performance measures (task completion time and collisions), as well as with the behavioral metric. This suggests that **the degree of the physical existence of the space in which participants operate -whether directly or remotely- can influence their performance and behavior.** While further studies are needed to confirm these findings, these results provide strong evidence of the differences that exist between the perception of remote and virtual environments and encourage further comparisons between them.

The study presented in this chapter was published (see [273]).

**ÉLABORATION D'UN MODÈLE UNIFIÉ DE LA
PRÉSENCE SPATIALE**

6.1 Introduction et motivation

Nous avons vu dans le chapitre 1 le fait que la présence spatiale revêtait une importance particulière depuis l'apparition du terme originel « téléprésence » [21]. Aussi, en se basant sur les différentes approches technique, rationnelle, écologique et psychologique, les chercheurs ont déterminé divers facteurs contribuant à l'émergence de ce phénomène psycho-cognitif. En fonctions de ces facteurs, de nombreux modèles théoriques ont été proposés pour conceptualiser la présence spatiale, modèles que nous avons catégorisés dans le chapitre 2 en :

- **modèles techniques** centrés sur les caractéristiques du système utilisé ;
- **modèles cognitifs** décrivant le processus mental de formation de la sensation de présence spatiale ;
- et **modèles multifactoriels** fusionnant différentes approches.

Néanmoins, ces modèles souffrent d'une opérationnalisation incohérente du concept en raison d'une confusion autour de la définition de la présence spatiale et de ses facteurs. Nous avons donc proposé - toujours dans le chapitre 2 - une première version d'un modèle conceptuel de la présence spatiale se basant sur les théories existantes et prenant en compte toutes les approches pour déterminer les facteurs les plus influents ; le but de ce modèle étant d'établir un consensus au sein de la communauté interdisciplinaire de recherche sur la présence.

Tout au long de la thèse, les résultats de nos travaux nous ont permis d'approfondir nos connaissances empiriques autour de la présence spatiale et de son lien avec différents facteurs. En particulier, nous avons mis en évidence dans chacun des chapitres précédents certaines modifications à appliquer à notre conceptualisation initiale. Ces modifications vont maintenant servir de base à l'élaboration d'un nouveau modèle de présence spatiale, plus riche, cohérent et inclusif que nous présentons dans le présent chapitre.

Objectifs et plan du chapitre

Ce chapitre représente l'aboutissement des travaux menés durant cette thèse. Il propose un modèle conceptuel de la présence spatiale sur la base des théories existantes dans la littérature et à la lumière des résultats expérimentaux obtenus (voir chapitres 3, 4 et 5).

Plus précisément, le chapitre commence par récapituler et mettre en exergue les principaux apports expérimentaux de nos travaux de recherche. Il présente ensuite notre modèle de la présence spatiale qui décrit avec détail l'impact des facteurs qui contribuent à la formation du phénomène ainsi que leurs relations. Le chapitre se conclut par la description des apports du modèle ainsi que certaines de ses limitations et les perspectives de travaux futurs qui pourraient en découler.

6.2 Apports expérimentaux

Au cours de cette thèse, nous avons mené deux études expérimentales et une analyse factorielle dans le but d'évaluer la présence spatiale et ses facteurs dans différents environnements immersifs. Ces études ont servi de fondement dans notre quête visant à l'élaboration d'un modèle conceptuel de la présence spatiale plus complet.

En particulier, durant la première étude (chapitre 3), notre attention a été attirée par la nécessité de structurer le modèle de sorte à expliciter le rôle des caractéristiques techniques du système. Comme Slater [39], nous soutenons que **le degré d'immersion délimite le cadre dans lequel la présence spatiale émerge** en permettant à l'utilisateur de percevoir l'environnement et d'interagir avec lui. Quant au degré d'interaction, il a une influence majeure dans le succès d'exécution des tâches au sein de l'environnement [122]. De plus, la mise en place du système a une influence sur la perception par les utilisateurs des actions possibles dans l'environnement. Par exemple, un visiocasque filaire donnera la sensation à l'utilisateur qu'il ne peut pas se déplacer librement.

L'analyse factorielle (chapitre 4) a quant à elle, mis en évidence **l'influence de l'agrément de l'utilisateur** dans l'émergence de la présence spatiale. L'analyse a également permis de distinguer deux facteurs liés à la validité écologique de l'environnement à savoir, **l'affordance** et **le degré de réalité** comme étant des facteurs principaux.

Pour finir, la deuxième étude expérimentale (chapitre 5) a souligné l'importance des facteurs écologiques dans la comparaison entre environnements distants et virtuels en mettant l'accent sur **l'influence de l'existence de l'espace physique sur le comportement des utilisateurs**. Cette étude nous a aussi fait prendre conscience de l'importance des avatars dans la construction mentale du soi (et des autres) dans l'environnement.

En nous basant sur ces réflexions, nous proposons maintenant une version révisée de notre modèle.

6.3 Notre modèle conceptuel de la présence spatiale

Pour faciliter la compréhension du modèle, nous commençons d'abord par présenter une version « simplifiée » de ce dernier, illustrée dans la figure 6.1. Ainsi, le modèle que nous proposons est composé de trois piliers principaux :

1. **L'utilisateur.** Comme la présence spatiale est une sensation subjective psycho-cognitive [12], sa formation résulte d'un processus mental dans lequel tous les facteurs sont combinés. En d'autres termes, la sensation de présence spatiale **n'existe qu'à travers l'expérience de l'utilisateur**.
2. **L'environnement.** Le terme « environnement » désigne tout espace perçu par un utilisateur. Cet espace peut être réel, distant, mixte ou virtuel.
3. **Le système.** L'environnement perçu par un utilisateur **doit faire l'objet d'une médiation**. Cette médiation peut être naturelle via nos capacités sensori-motrices innées comme dans notre vie quotidienne, ou distante ou virtuelle comme lors de l'utilisation de technologies de téléopération et de RV. Cette approche se base sur

celle de Gibson qui soutient que notre expérience du monde est toujours médiatisée (i.e. que notre perception du monde n'est pas la même que le monde lui-même) [52]. Ainsi, nous employons le terme « système » pour désigner tout type de médiation entre un utilisateur et l'environnement qu'il perçoit.

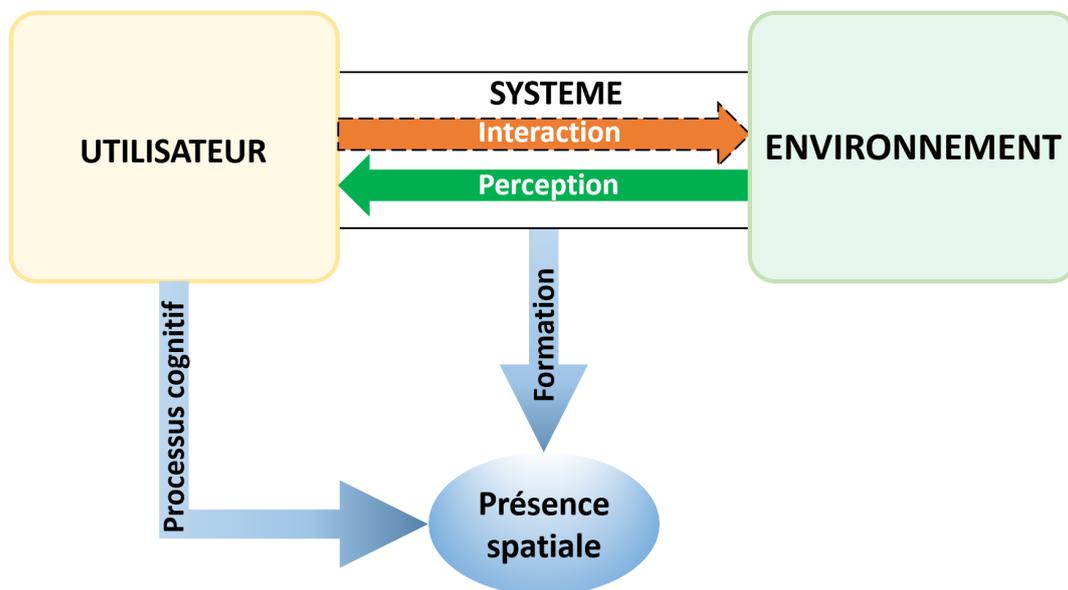


FIGURE 6.1 – Modèle conceptuel de la présence spatiale simplifié composé des trois piliers : UTILISATEUR, SYSTÈME et ENVIRONNEMENT.

La figure 6.1 montre que l'utilisateur perçoit l'environnement via à un système - plus au moins fidèle - de médiation, illustré par une flèche intitulée « Perception ». En plus de permettre la perception de l'environnement, le système donne à l'utilisateur la possibilité d'impacter l'environnement grâce à ses actions. Cet aspect est illustré par une flèche « Interaction » qui est dessinée en pointillés pour souligner le fait que les actions de l'utilisateur peuvent ne pas avoir de conséquences réelles, en particulier si l'espace représenté par l'environnement n'existe pas (ex. les environnements virtuels).

De plus, deux autres flèches, l'une partant de l'utilisateur nommée « Processus cognitif » et l'autre partant du système nommée « Formation », toutes les deux allant vers la composante « Présence spatiale », illustrent le processus mental au sein de l'utilisateur lors de la formation de la présence spatiale qui se produit dans le cadre délimité par le système et donc, par le biais de l'environnement perçu.

En plus des trois piliers **UTILISATEUR-SYSTÈME-ENVIRONNEMENT**, nous proposons d'ajouter au modèle une composante faisant référence à l'activité ou à la tâche qu'il incombe à l'utilisateur d'exécuter lorsqu'il se trouve dans l'environnement (voir figure 6.2). Nous avons nommé cette composante « **TACHE** » et avons choisi de la considérer comme une composante secondaire dans notre modèle en nous basant sur l'approche rationnelle (même si la tâche est liée au déroulement des événements dans l'environnement, appelé aussi « scénario » [44]). Plus précisément, nous soutenons que la performance « perçue » influence l'expérience vécue par l'utilisateur dans

l'environnement et donc peut potentiellement influencer le degré de présence spatiale expérimenté [3]. De même, l'utilisateur influence la performance en choisissant de s'impliquer dans la tâche et d'y allouer des ressources [11].

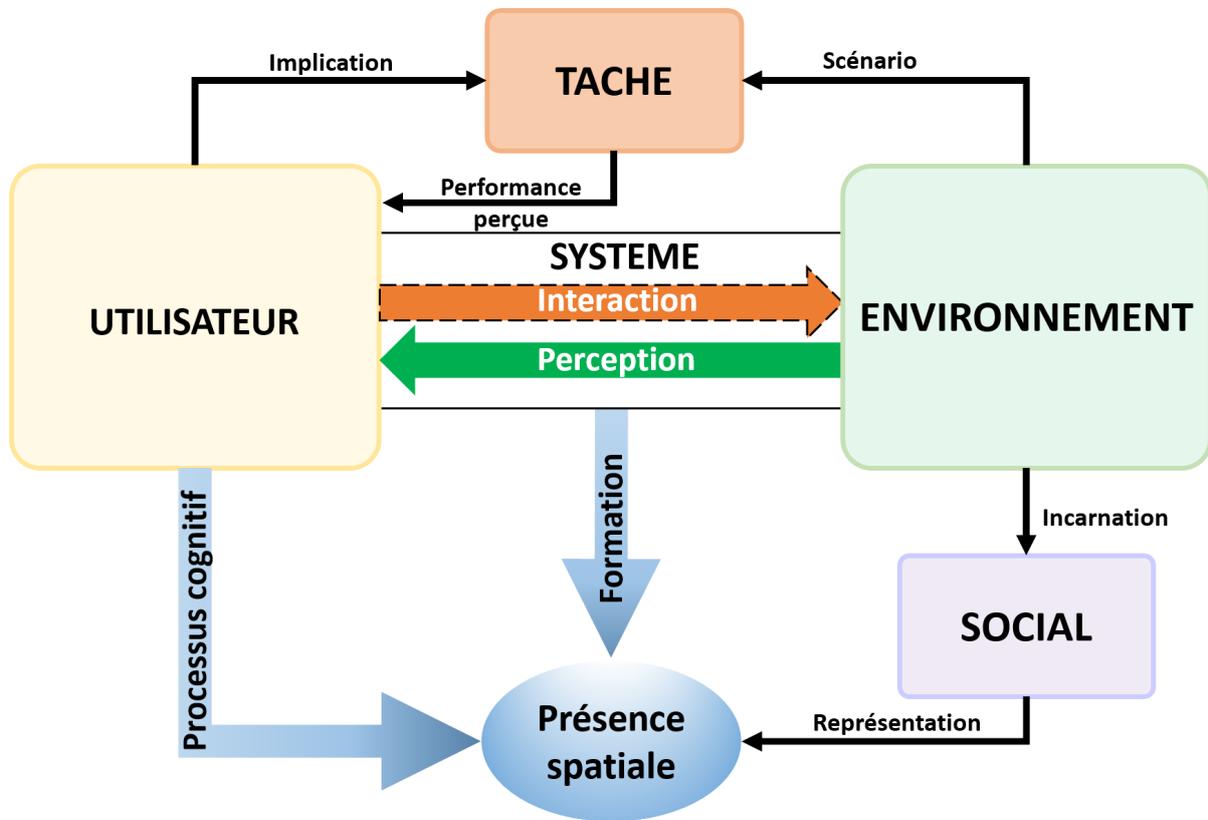


FIGURE 6.2 – Modèle conceptuel de la présence spatiale intégrant les deux composantes « TACHE » et « SOCIAL ».

Nous avons également souhaité souligner que l'environnement pouvait être expérimenté avec d'autres entités réelles ou virtuelles [56]. Nous avons donc ajouté une deuxième composante secondaire que nous avons nommée « **SOCIAL** » dans le but de prendre en compte les **environnements multi-utilisateurs**. Cette composante contribue à l'émergence de la sensation de présence spatiale d'un utilisateur à travers l'« incarnation » des entités (généralement représentées sous forme d'avatars) qui, combinée à la sensation de présence sociale (i.e. être en présence de ces entités) active l'« incarnation sociale » [274].

En nous basant sur ces cinq composantes, nous avons classé les facteurs jouant un rôle positif ou négatif dans la formation de la présence spatiale en cinq catégories liés à :

1. La composante « **UTILISATEUR** ».
2. La composante « **ENVIRONNEMENT** ».
3. La composante « **SYSTÈME** ».
4. La composante « **TACHE** ».
5. La composante « **SOCIAL** ».

Nous présentons maintenant ces facteurs au sein de leur composante respective. Toutes les composantes seront accompagnées d'une figure illustrative. A noter que dans ces illustrations :

1. Les cases rouges représentent les facteurs les plus influents, suivies des cases oranges représentant les facteurs de second ordre, puis des cases noires représentant les facteurs les moins importants de troisième ordre. **Notre classement des facteurs par ordre d'importance est basé sur l'analyse factorielle du questionnaire (voir 4.6 du chapitre 4).**
2. Les flèches en pointillés représentent les relations d'influence entre facteurs. La direction va du facteur influent au facteur influencé.
3. Les autres flèches représentent les relations de spécification allant d'un concept général à un concept plus spécifique.

6.3.1 Facteurs du modèle

Facteurs liés à l'utilisateur

La figure 6.3 illustre les facteurs faisant référence aux caractéristiques psychologiques de l'utilisateur. Deux facteurs sont particulièrement mis en évidence : l'« **agrément** » de l'utilisateur et l'« **attention** » qu'il/elle alloue aux activités et événements liés à l'environnement, avec une influence positive de l'agrément sur le niveau d'attention que l'utilisateur choisit d'accorder. Le choix de l'agrément et de l'attention comme facteurs psychologiques principaux est orienté par les résultats de notre analyse factorielle lors du développement du questionnaire SP-IE (voir chapitre 4) ainsi que certains travaux existants dans la littérature [156, 34].

En plus de ces facteurs, le modèle souligne l'importance de prendre en compte les « différences individuelles » notamment l'« intérêt » que l'utilisateur porte aux activités de l'environnement qui peut influencer le degré d'agrément de l'utilisateur et son niveau d'attention [156, 11].

Le modèle met également l'accent sur la tendance de l'utilisateur à subir le « mal des simulateurs » et son niveau de « familiarité » ou d'expertise avec le système utilisé, ce dernier ayant une influence sur un autre facteur psychologique à savoir la « suspension d'incrédulité » de l'utilisateur. Nous choisissons cependant de ne pas parler de « *volonté* » de suspension car l'utilisateur ne peut pas « *décider* » volontairement de croire qu'il/elle se trouve dans un environnement autre que celui où son corps se situe physiquement [181]. La suspension de l'incrédulité reste néanmoins une condition nécessaire à l'émergence de la présence [12].

Facteurs liés au système

Comme dit plus haut, l'utilisateur perçoit son environnement à l'aide d'un système de médiation. Ce système permet de produire/restituer l'environnement avec un degré de **fidélité sensorimotrice** plus au moins élevé¹. Il

1. Pour rappel, la fidélité sensorimotrice désigne la mesure dans laquelle les canaux sensori-moteurs utilisés par le système sont de qualité suffisante en comparaison des canaux sensori-moteurs dont les utilisateurs sont dotés (dans le monde réel).

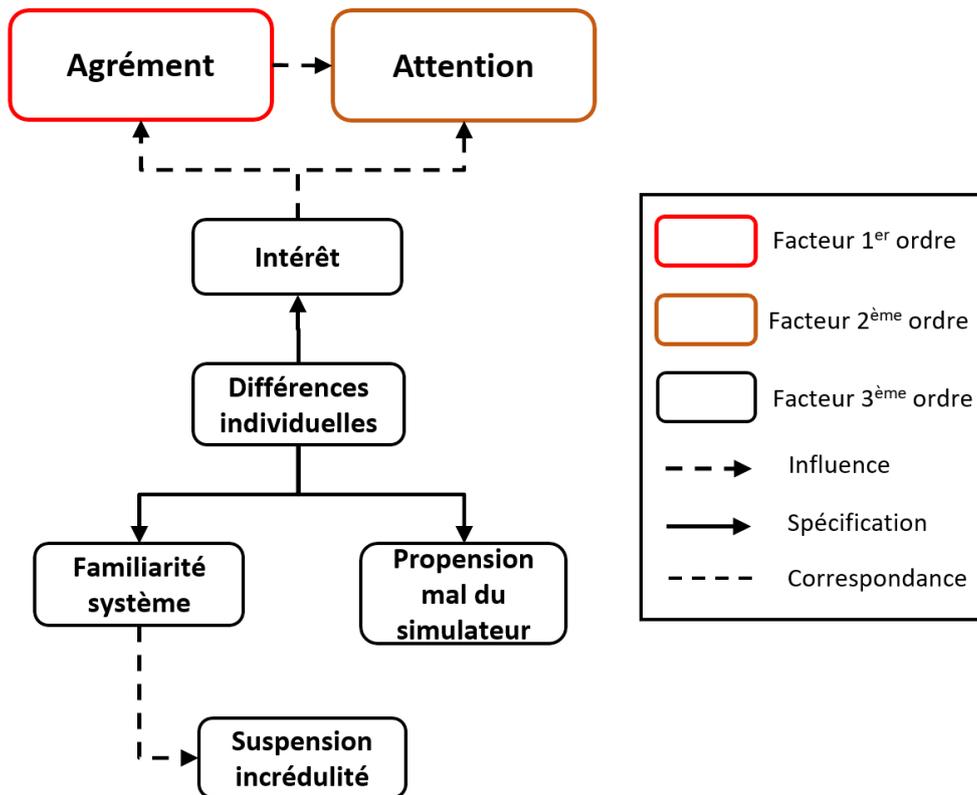


FIGURE 6.3 – Composante « UTILISATEUR » du modèle.

existe une relation étroite entre la présence spatiale et la fidélité des systèmes [3, 119, 108] : plus le degré de fidélité est élevé, plus la médiation de l'environnement est considérée par l'utilisateur comme « *naturelle* », ce qui augmente sa sensation de présence spatiale. Dans le cas spécifique où l'utilisateur se trouve dans un environnement réel, le système de médiation est considérée comme totalement naturel [52]. Par conséquent, l'utilisateur « *doit* » éprouver une sensation de présence spatiale très élevée, voire maximal si on considère qu'on ne peut pas être plus présent que dans le monde réel (ce qui reste encore à démontrer).

Dans le présent modèle (voir figure 6.4), nous mettons donc en avant l'influence positive du facteur de « **fidélité** » sensori-motrice. Ce dernier est lié à deux facteurs : l'« immersion » (fidélité sensorielle) [17] et l'« interaction » (fidélité motrice) [49].

Par ailleurs, **le système peut également avoir un impact négatif** sur la formation de la présence : un champ de vision limité, une latence trop forte, des mécanismes action-réponse mal couplés voire des câbles encombrants qui gênent l'utilisateur, peuvent entraîner des interruption de présence [87, 95]. Nous avons donc ajouté dans la composante « **SYSTÈME** » trois facteurs négatifs à savoir la « latence », les « conflits sensoriels » action-réponse et les « imperfections du matériel » que nous avons rassemblés sous un facteur nommé « **facteurs négatifs du système** ».

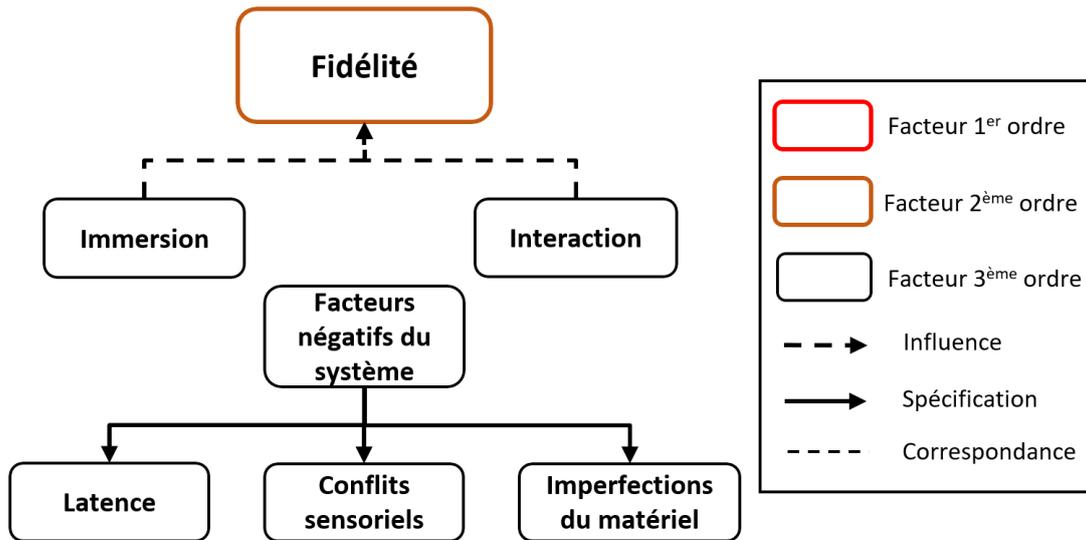


FIGURE 6.4 – Composante « SYSTÈME » du modèle.

Facteurs liés à l'environnement

La figure 6.5 illustre les facteurs liés à la composante « ENVIRONNEMENT ». Deux facteurs principaux sont inclus : l'« **affordance** » de l'environnement [268] et son niveau de « **réalité subjective** » [175, 102].

Comme dit précédemment, l'affordance contribue à la sensation de présence spatiale à travers la perception de l'utilisateur des « actions possibles » dans l'environnement [171] et la correspondance ou l'« adéquation » entre cette perception et la façon dont l'environnement réagit concrètement aux actions de l'utilisateur [52].

Concernant le degré de réalité, il est principalement lié au « type » d'environnement d'une part, par exemple un environnement réel ou distant induira une prise de conscience de l'« existence de l'espace » physique et des conséquences des actions de l'utilisateur dans cet espace, ce qui influencera son expérience de la réalité de l'environnement. D'autre part, le degré de réalité est lié au « contenu » de l'environnement, par exemple un scénario cohérent selon les attentes des utilisateurs renforcera l'illusion de « plausibilité » que les événements se passent vraiment [39, 36] ce qui aura pour effet d'augmenter le niveau de réalité perçue.

Un autre facteur que nous avons voulu mettre en avant dans cette dimension est la sensation d'« incarnation » de l'utilisateur qui contribue à la construction d'une représentation mentale de lui-même dans l'environnement et qui influence positivement son niveau de présence [64, 65].

Facteurs liés à la tâche

Le modèle souligne le « type » (ou la nature) de la tâche et la « performance » (l'efficacité) de l'utilisateur dans l'accomplissement de cette tâche (voir figure 6.6). L'intérêt de la composante « TACHE » au sein du modèle se situe dans ses relations externes avec la composante « UTILISATEUR » et « ENVIRONNEMENT » que nous détaillerons plus loin dans la section.

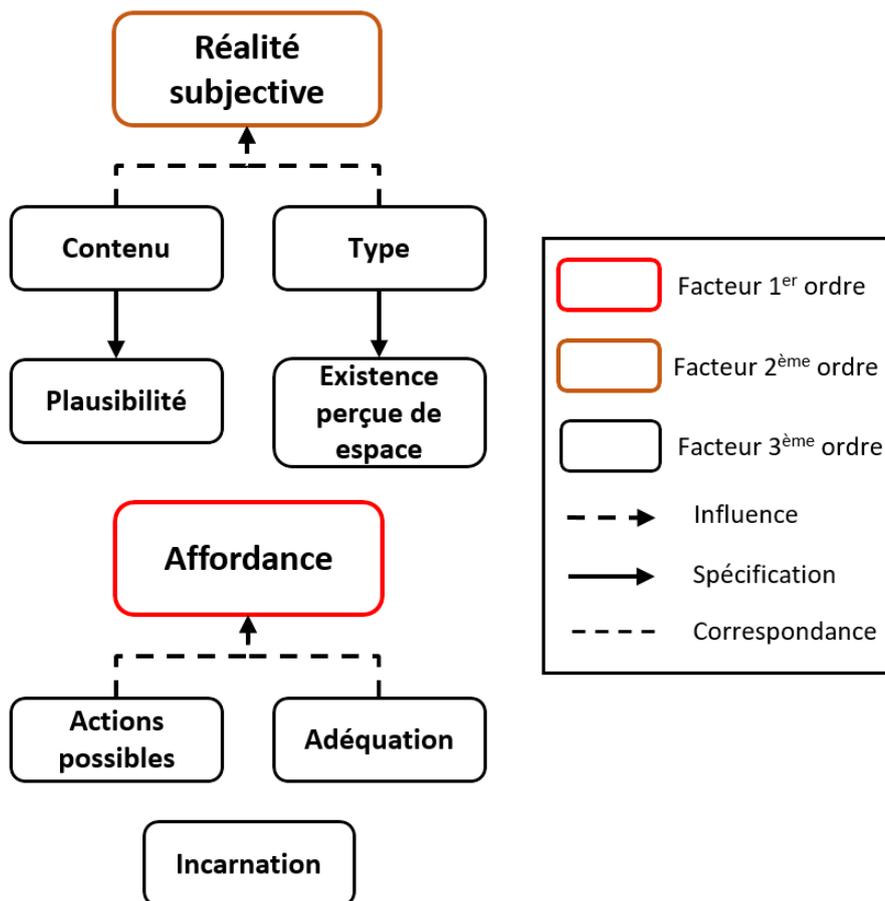


FIGURE 6.5 – Composante « ENVIRONNEMENT » du modèle.

Facteurs liés à la dimension sociale

La composante « SOCIAL » du modèle, illustrée en figure 6.7, ne contient qu'un seul facteur principal : l'« **incarnation sociale** » [268] qui résulte de la combinaison de la sensation de l'utilisateur d'être avec d'autres entités - humaines ou générées par ordinateur - (i.e. la sensation de présence sociale [32, 51]) et de la sensation d'incarnation de ces entités. En d'autres termes, ce facteur fait référence à la construction d'une représentation mentale des autres. Même si cette représentation peut être psychologiquement supposée par l'utilisateur [56], il est démontré que l'utilisation d'avatars renforce la sensation de présence sociale [49, 275] et permet une meilleure incarnation [70, 33].

En outre, nous soutenons que l'utilisation d'avatars est un facteur à prendre en compte dans la conceptualisation de la présence spatiale. Pour illustrer cette idée, une case « entité » a été ajoutée à la composante « SOCIAL » qui sera reliée dans le modèle final à une case nommée « avatar » ajoutée à la composante « SYSTÈME » signifiant que : **l'utilisateur perçoit les « autres » sous forme d'avatars via le système de médiation.**

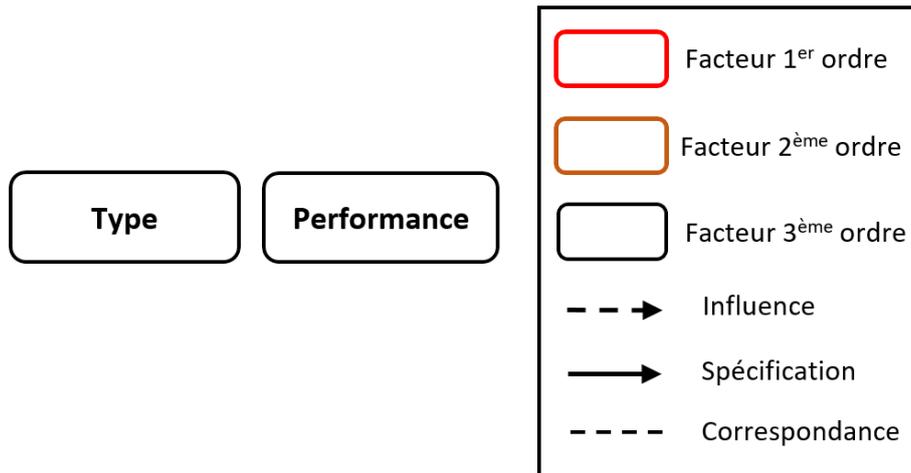


FIGURE 6.6 – Composante « TACHE » du modèle.

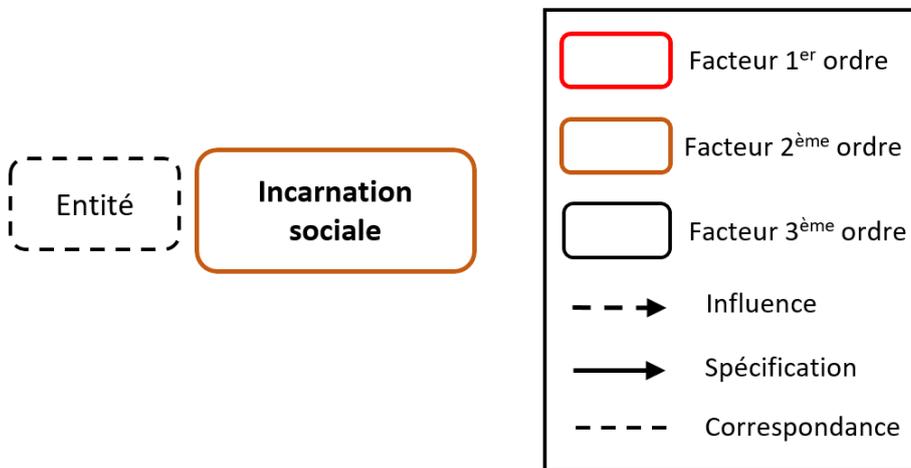


FIGURE 6.7 – Composante « SOCIAL » du modèle.

Le facteur cybersickness

La sensation de cybersickness ou « mal des simulateurs » peut impacter négativement la présence spatiale jusqu'à provoquer une rupture dans le processus de sa formation [276]. Pouvant prendre la forme de nausées, de maux de tête et d'étourdissements pendant l'expérience, le mal des simulateurs est principalement dû à des conflits sensoriels entre les systèmes visuel et vestibulaire de l'utilisateur [165] (d'autres facteurs peuvent entrer en jeu et nous allons les décrire dans la section 6.3.2).

Ce phénomène est donc très lié aux caractéristiques psychologiques de l'utilisateur. Cependant, nous avons choisi de ne pas l'introduire dans la composante « UTILISATEUR ». Au lieu de cela, il sera représenté dans le modèle comme une composante indépendante des cinq autres afin de souligner son très fort impact et illustrer la nécessité de le prendre en compte lors de l'étude de la présence spatiale.

La figure 6.8 expose la version détaillée de notre modèle conceptuel de la présence spatiale. Nous avons décrit dans la section précédente les facteurs de chaque dimension ainsi que les relations internes (intra-dimensions). Dans ce qui suit, nous décrivons à présent les relations inter-dimensions.

6.3.2 Relations entre facteurs de dimensions différentes

Un facteur dont nous n'avons pas fait état précédemment est le facteur d'« **implication** » de l'utilisateur qui est nécessaire dans la formation de la présence spatiale [34, 157, 178, 179, 41]. En accord avec la vision de Csikszentmihalyi [277] qui décrit l'implication comme un équilibre entre le défi de la tâche et les compétences de l'utilisateur, nous considérons ce facteur plutôt comme **un flux permanent durant l'expérience** qui naît de l'attention que l'utilisateur alloue pour accomplir la tâche. Nous avons donc choisi d'intégrer le facteur d'implication dans le modèle sous forme de relation entre le niveau d'attention de l'utilisateur et la tâche à accomplir.

Inversement, le niveau de performance agit sur le facteur psychologique d'agrément. Plus précisément, nous soutenons que c'est **la perception que l'utilisateur a de sa performance** qui influence positivement (succès perçu) ou négativement (échec perçu) son niveau d'agrément. Le type ou la nature de la tâche quant à elle, peut impacter l'attention allouée (ex., au cours d'une tâche engageante, un utilisateur est susceptible d'allouer plus de ressources [49]), la nature de la tâche étant elle-même influencée par le **récit scénaristique** de l'environnement en rapport avec son contenu.

Concernant la relation entre l'utilisateur et le système, le modèle souligne le rôle de l'immersion dans l'éveil de l'attention de l'utilisateur [278] ainsi que l'influence de la latence (perçue) par l'utilisateur sur sa capacité à suspendre son incrédulité.

Par ailleurs, le système a une influence considérable sur les facteurs liés à l'environnement médié : **l'immersion renforce le degré de réalité et l'interaction contribue à un meilleur degré d'affordance de l'environnement**. Cependant, le système peut également impacter négativement la perception de l'environnement si les critères techniques ne sont pas satisfaisants [86]. Par exemple, des câblages encombrants affectent la perception de l'utilisateur des actions possibles (voir chapitre 5).

Pour finir, le mal des simulateurs (cybersickness) est principalement lié à des conflits sensoriels [165]. Cependant, il peut également être généré par la latence du système [166] ou être dû à un contenu de l'environnement intrinsèquement générateur de désorientation (ex., environnement virtuel représentant des montagnes russes). Le mal des systèmes est aussi fortement lié à la tendance innée de l'utilisateur à être malade² : certains utilisateurs sont plus sensibles aux conflits sensoriels et aux contenus désorientant que d'autres.

2. Il est possible de s'entraîner à résister au cybersickness, c'est à dire à opérer malgré les symptômes.

6.4 Conclusion

De nombreux chercheurs ont proposé différents modèles visant à conceptualiser la présence spatiale. Cependant, les modèles proposés jusqu'ici souffrent d'incohérences dues à des définitions divergentes du concept et des approches différentes pour déterminer les facteurs sous-jacents à la présence spatiale. Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle conceptuel global de la présence spatiale ayant pour but d'unifier les théories existantes en mettant en lumière et en clarifiant les relations entre les différentes catégories de facteurs.

Le modèle est composé de trois composantes principales : (1) l'utilisateur, (2) le système de médiation et (3) l'environnement perçu par l'utilisateur grâce au système et dans lequel il/elle a la sensation d'être présent. A cela s'ajoute deux composantes secondaires relatives à (4) la tâche à accomplir par l'utilisateur au sein de l'environnement et à (5) la présence d'autres entités avec l'utilisateur (dimension sociale).

Cette décomposition s'est fondée sur les différentes approches suivies par les chercheurs pour déterminer les facteurs de la présence spatiale (voir chapitre 2, section 2.2). **Ainsi, le modèle met en avant les facteurs psychologiques impactant l'émergence de la sensation chez l'utilisateur, le rôle des caractéristiques techniques du système pour délimiter le cadre où l'expérience de la présence spatiale peut se produire, l'importance de percevoir un environnement écologiquement valide, ainsi que l'influence de la tâche à accomplir et l'existence d'autres entités au sein de l'environnement.**

En outre, en proposant une telle conceptualisation, nous avons voulu mettre en avant le processus cognitif qui s'opère au sein de l'utilisateur et qui est à la base de l'émergence de cette sensation d'« être là ». La présence spatiale étant un phénomène psycho-cognitif, les autres composantes ne sont au final définies et utilisées que pour définir analytiquement et éventuellement pour optimiser le processus.

Sur cette base, les principaux facteurs jouant un rôle dans l'émergence de la présence spatiale ont été identifiés ainsi que les relations qui existent entre ces facteurs au sein d'une même composante et entre composantes différentes. De plus, le modèle établit un ordre des facteurs en fonction de l'importance de leur contribution dans l'émergence de la présence spatiale (en se basant en particulier sur l'analyse factorielle décrite dans le chapitre 4). Le modèle a ainsi pour but d'aider les chercheurs à comprendre la relation entre les différentes composantes de la présence spatiale et de prédire son émergence, son maintien ou son déficit.

Pour finir, lors de son élaboration, nous avons pris soin de ne pas lier le modèle à un environnement matériel ou logiciel en particulier. Il est donc **applicable à différentes technologies immersives et différents types de simulation**. Par conséquent, il pourrait servir de base dans la comparaison des propositions théoriques et des résultats empiriques sur la présence spatiale dans différentes études.

Limitations et perspectives

Ce modèle est une tentative d'unifier les différentes conceptualisations de la présence spatiale qui existent en un seul modèle aussi complet que possible. Un modèle communément accepté selon nous, est la seule solution pour appréhender la compréhension du concept et garantir des progrès au sein de la communauté interdisciplinaire de la recherche sur la présence.

Toutefois, le modèle présenté dans ce chapitre n'est évidemment pas et ne doit pas être considéré comme un modèle définitif de la présence spatiale : il prétend seulement réaliser une synthèse entre les connaissances antérieures à ce travail et nos analyses issues de l'expérimentation. Par conséquent, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour affiner et/ou corriger notre modèle. Des études futures devront notamment évaluer la sensibilité et la validité du modèle en tant qu'outil pour comparer la présence spatiale dans différents environnements immersifs. Ces études pourront également permettre de décomposer les différents facteurs en composantes plus fines de sorte que le modèle soit plus détaillé encore.

De plus, dans le premier chapitre de cette thèse (section 1.6.4), nous avons mentionné la présence spatiale en environnements mixtes. Or, nous ne l'avons pas prise en compte dans la conception de notre modèle. Des travaux supplémentaires seront donc nécessaires pour étudier plus en détail la présence spatiale dans ce cas particulier et voir comment le modèle pourrait, si nécessaire, être adapté. Il serait également intéressant d'étudier la présence spatiale en milieu collaboratif qui représente un contexte d'application très répandu. Enfin, il est important de noter que les progrès technologiques conduisent à une miniaturisation et une nomadisation croissante des systèmes. Une étude approfondie sur l'influence de la taille des systèmes de restitution sur les différents paramètres du modèle donnerait sans doute des résultats fructueux. Toutes ces études augmenteraient la validité et donc la popularité du modèle.

English Summary

In this chapter, a conceptual model of spatial presence is proposed with the aim of unifying existing theories and clarifying the relationships between the different categories of factors.

The model is composed of three main components : (1) **the user**, (2) **the mediation system**, and (3) **the environment** perceived by the user through the system and in which he/she feels present. Besides, there are two secondary components related to (4) **the task** to be performed by the user within the environment and (5) **the presence of other entities** with the user (social dimension).

This decomposition was based on the different approaches followed by researchers to determine the factors of spatial presence (see chapter 2) combining the findings from our two experimental studies (see chapter 3 and chapter 5).

Thus, **the model highlights the psychological factors affecting the emergence of the feeling of spatial presence in the user, the role of the technical characteristics of the system in delimiting the framework in which the experience of spatial presence can occur, the importance of perceiving an ecologically valid environment, as well as the influence of the task to be performed and the existence (or not) of other entities within the environment.**

On this basis, the main factors as well as the relationships their between within the same component and

between different components have been identified.

In addition, the model establishes an order of factors according to the importance of their contribution to the emergence of spatial presence (based in particular on the factor analysis described in chapter 4). Therefore, the model can help researchers **understanding the relationship between the different components of spatial presence and predicting its emergence or deficit.**

Furthermore, care was taken not to link the model during its elaboration to a particular hardware or software environment. It is therefore **applicable to the exposure of different immersive technologies and different types of simulations.** It could be then used for comparing theoretical propositions and empirical results on spatial presence in different studies.

Thus, this model is an attempt to unify the different conceptualizations of spatial presence that exist into a single model that is as complete as possible, which is necessary to ensure progress within the interdisciplinary presence research community. However, the model presented in this chapter is not and should not be considered as a definitive model of spatial presence : it only claims to achieve a synthesis between the knowledge prior to this work and our analyses resulting from our experimentations.

An article that describes this spatial presence model and its components is currently under review.

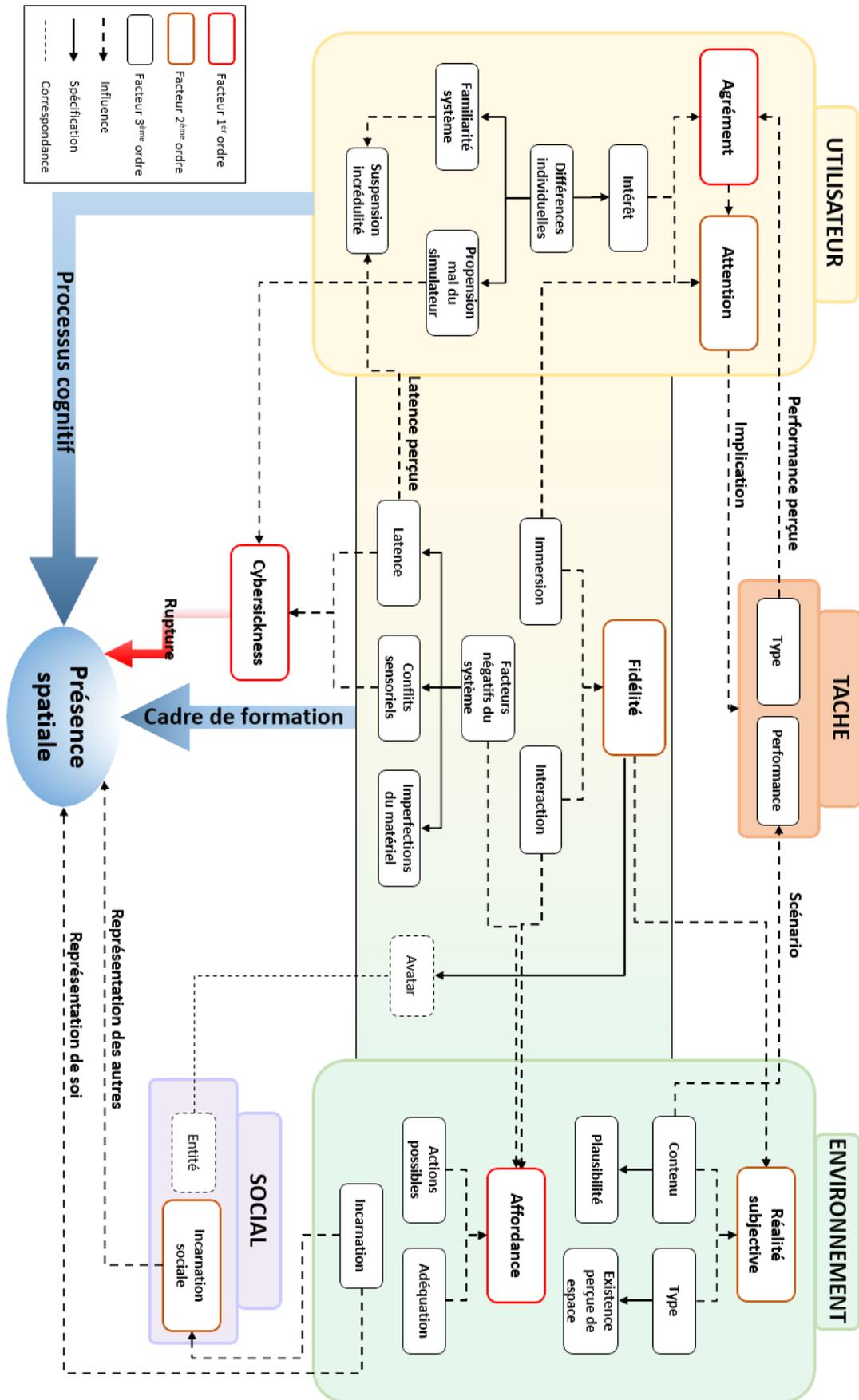


FIGURE 6.8 – Modèle conceptuel de la présence spatiale détaillé.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette thèse s'articule autour de la **présence spatiale** dont la caractéristique essentielle est « la sensation d'un utilisateur d'être physiquement situé dans un environnement » ce dernier pouvant être réel, distant ou virtuel.

De nombreux chercheurs en robotique et en réalité virtuelle ont étudié ce phénomène dans le but d'améliorer l'efficacité de leurs applications. La présence spatiale peut notamment faciliter le transfert d'informations nécessaires au succès d'opérations chirurgicales distantes ou améliorer les capacités d'apprentissage dans le cadre d'un enseignement à distance. De plus, elle peut intensifier les effets positifs des applications et leur impact sur les réactions émotionnelles des utilisateurs comme le plaisir et la satisfaction dans les jeux ou la peur et l'anxiété lors de thérapies virtuelles.

De nombreuses études ont ainsi été menées dans le but de comprendre le processus de formation de la présence spatiale, trouver des moyens valides de mesurer son intensité dans différents systèmes et apprendre à prédire sa variabilité selon l'utilisateur et l'environnement dans lequel il est immergé. En particuliers, les chercheurs ont souligné l'influence de différents facteurs dans l'émergence de cette sensation qu'ils ont regroupés sous formes de **modèles conceptuels**. Cependant, en raison de la confusion terminologique et théorique autour du concept et de la diversité des approches adoptées pour déterminer les facteurs de la présence, ces modèles souffrent d'une opérationnalisation non systématique et incohérente du concept.

Cette thèse s'inscrit dans une perspective d'**unifier la conceptualisation de la présence spatiale** et d'expliquer sa formation en proposant un modèle conceptuel global décrivant les facteurs qui contribuent à son émergence ainsi que les relations qui les lient.

Contributions de la thèse

Dans la première partie de ce manuscrit, la détermination de l'origine de la présence et de ses définitions, la description de ses divers formes, la présentation de ses méthodes d'évaluation subjectives et objectives et la caractérisation de l'expérience de présence spatiale dans différents environnements immersifs (réel, distant, mixte et virtuel) ont permis de dresser un tableau exhaustif autour du concept. S'en est suivi l'analyse des approches principales (technique, rationnelle, écologique et psychologique) pour déterminer les facteurs qui contribuent à l'émergence du phénomène ainsi que la mise en lumière des modèles théoriques et conceptuels existants dans la littérature. Cet état de l'art nous a servi de base pour proposer un nouveau modèle de la présence spatiale.

Dans la deuxième partie du manuscrit, deux études expérimentales ont été menées dans le but d'évaluer la présence spatiale et certains de ses facteurs et ce, dans différents environnements immersifs. Une importance particulière a été donnée à la sensation de présence spatiale engendrée en environnements distants, plus communément appelée **téléprésence**. La téléprésence souffre d'un manque d'intérêt de la part des chercheurs comparée à son homologue en environnements virtuels. Ce manque peut s'expliquer en partie par le traitement des environnements virtuels et distants comme étant un seul type d'environnements, à savoir, des environnements dits « médiatisés » basés sur des interfaces de rendu et des technologies similaires.

Les résultats des deux études expérimentales basés sur les réponses fournies par des participants aux questionnaires ont montré une sensation d'hyper-présence dans l'environnement distant comparé à l'environnement réel (étude 1) et un degré de réalité perçue³ plus élevée dans l'environnement distant comparé à l'environnement virtuel (étude 2). De plus, les résultats basés sur des métriques cinématiques comportementales ont mis en évidence **une plus grande similitude de l'environnement réel avec l'environnement distant** en comparaison à l'environnement virtuel (étude 2).

Le second objectif de ces deux études était d'évaluer les corrélations entre les réponses subjectives des questionnaires et les méthodes d'évaluation objectives basées sur la performance et le comportement des utilisateurs. Des corrélations positives ont été trouvées entre la présence spatiale et la performance ainsi qu'entre le degré de réalité et certaines mesures comportementales. Ces résultats sont prometteurs en ce qui concerne la fiabilité des mesures objectives pour évaluer la présence tout en encourageant l'utilisation de plusieurs types de mesures complémentaires. De plus, ils mettent en avant **la relation entre le comportement des utilisateurs et leur conscience de la réalité de l'espace**, qu'ils se trouvent directement dans cet espace ou à distance. Ces résultats sont un premier pas pour la caractérisation des environnements distants par rapport aux environnements virtuels.

En parallèle à ces études s'est profilée la nécessité de **développer notre propre questionnaire de présence spatiale**, d'abord pour obtenir des résultats valides lors de l'administration du questionnaire à une **population fran-**

3. Pour rappel, le degré de réalité fait référence à la mesure dans laquelle l'environnement est considéré comme réel avec des conséquences physiques.

cophone⁴ mais aussi pour prendre en compte l'évolution des technologies de réalité virtuelle durant cette dernière décennie et mettre potentiellement en lumière de nouveaux facteurs de la présence spatiale.

Pour mener à bien le processus de développement, nous avons adopté une démarche divisée en deux grandes parties : (1) **la construction et la traduction** du questionnaire en se basant sur les questionnaires les plus utilisés dans la littérature puis (2) sa **validation** à l'aide d'analyses factorielles sur un grand échantillon de données. Le processus s'est terminé par l'obtention d'un questionnaire à sept échelles, à savoir, la présence spatiale, l'affordance, l'agrément, l'attention, la réalité, la présence sociale et les effets négatifs, comprenant 20 items avec une bonne cohérence interne, une validité convergente satisfaisante et une bonne adéquation de structure.

Ainsi, en plus de l'intérêt intrinsèque d'avoir mis en place un processus de construction de validation clair et complet, ce travail a donné lieu à un questionnaire soutenant la multidimensionnalité de la présence spatiale, soulignant la différence d'impact des facteurs sur la présence spatiale et mettant l'accent sur des facteurs négligés dans d'autres questionnaires notamment l'**affordance** et le **degré de réalité**.

Tout au long de la thèse, les résultats de ces travaux, menés sur plus de 250 participants, nous ont permis d'approfondir notre compréhension de la présence spatiale et de modifier en conséquence notre modèle conceptuel. Le modèle que nous proposons est ainsi composé de trois composantes principales : (1) **l'utilisateur**, (2) **le système de médiation**, et (3) **l'environnement** perçu par l'utilisateur via le système dans lequel il/elle se sent présent. A cela s'ajoute deux composantes secondaires relatives à (4) **la tâche** à accomplir par l'utilisateur au sein de l'environnement et à (5) **la dimension sociale** liée à la présence d'autres entités avec l'utilisateur.

Ainsi, **le modèle met en avant les facteurs psychologiques impactant l'émergence de la sensation de présence chez l'utilisateur, le rôle des caractéristiques techniques du système dans la délimitation du cadre où l'expérience de la présence spatiale peut se produire, l'importance de percevoir un environnement écologiquement valide, ainsi que l'influence de la tâche à accomplir et l'existence d'autres entités au sein de l'environnement**. En outre, en proposant une telle conceptualisation, nous avons voulu mettre en avant le processus cognitif de l'utilisateur en tant que base de l'émergence de la sensation de présence spatiale. Cette dernière étant un phénomène psycho-cognitif, les autres composantes ne sont au final là « que » pour contribuer au processus de formation.

Sur cette base, **les principaux facteurs qui jouent un rôle dans l'émergence de la présence spatiale ont été identifiés** ainsi que les relations qui existent entre facteurs au sein d'une même composante et entre composantes différentes. De plus, le modèle établit un **ordre des facteurs** en fonction de l'importance de leur contribution dans l'émergence de la présence spatiale. Pour finir, une attention particulière a été allouée au fait de ne pas lier le modèle élaboré à un environnement spécifique. Il est donc applicable à différents systèmes immersifs. Par conséquent, il pourra servir de base dans la comparaison des propositions théoriques et des résultats empiriques au sein et

4. La validité d'un questionnaire n'est pas extensible dans une autre langue que celle dans laquelle il a été validé, en l'occurrence tous les questionnaires validés et mesurant la présence spatiale sont en anglais.

entre les disciplines autour du concept de la présence spatiale. En d'autres termes, le modèle pourra aider à la construction des connaissances et à l'amélioration de la communication entre chercheurs.

Perspectives

Dans une tentative d'unifier les différentes conceptualisations autour du phénomène complexe qu'est la présence spatiale, nous avons proposé un modèle global aussi détaillé que possible de ses facteurs. Toutefois, ce modèle n'est pas parfait. Par conséquent, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour l'affiner et/ou le corriger.

En particulier, il serait intéressant d'établir le « poids » précis de chaque facteur du modèle sous forme d'une « équation de la présence spatiale » (comme dans [43]) afin de prédire sa variabilité. Pour ce faire, nous préconisons d'utiliser les nouvelles méthodes psycho-cognitives pour évaluer l'influence de différents facteurs [7]. L'approche sur laquelle se basent ces méthodes consiste à :

1. Exposer des participants à un environnement dont la configuration présente un degré maximal de certains facteurs (ex., le degré de réalité perçue).
2. Leur demander de se souvenir du niveau de présence spatiale qu'ils ressentent dans cet environnement.
3. Les exposer à plusieurs « version réduites » de l'environnement de départ.
4. Leur demander de faire correspondre chaque version de l'environnement à la présence ressentie initialement en améliorant le niveau des facteurs proposés dans l'ordre qu'ils jugent approprié.

Ce faisant, nous pourrions générer **un ordre des facteurs classés selon l'importance de chacun dans la formation de la présence spatiale**. De telles études permettraient également de décomposer les différents facteurs en composantes plus fines de sorte que le modèle soit plus détaillé encore.

Comme pour le modèle, les travaux que nous avons menés durant cette thèse ne sont pas exempts de défauts. Spécifiquement, le canal sensori-moteur haptique n'a pas été pris en compte lors de nos expérimentations, ce qui a pu porter préjudice à l'évaluation de la présence spatiale, surtout dans le cadre des environnements distants. En particulier, lors de notre deuxième expérimentation (décrite dans le chapitre 5), les secousses du fauteuil roulant (produites par la friction avec le sol) étaient visuellement reflétées dans le visocasque sans être ressenties physiquement par les participants se trouvant à distance. Cette différence entre ce qui était perçu et ce qui était vécu peut avoir eu une incidence considérable sur le degré d'affordance de l'environnement et donc sur le niveau de présence ressentie.

Avec un rafraîchissement à 1 kHz, la mise en place d'un canal haptique en temps-réel est technologiquement possible. Cependant, le déploiement d'une telle technologie reste très délicat et beaucoup plus onéreux que pour les canaux sensoriels visuel et audio. C'est pourquoi ce canal n'a pas été étudié dans le cadre de cette thèse.

Néanmoins, des stimulus haptiques devraient être intégrés lors des prochaines études, d'une part pour éviter ce genre de biais et d'autre part pour **étudier l'influence de l'haptique** sur l'émergence de la présence spatiale.

Une autre limitation qui a marqué nos expérimentations est l'absence d'utilisation d'avatars. Or, différentes études ont montré l'importance des avatars dans la construction d'un modèle mental virtuel de soi et des autres dans l'environnement en permettant l'incarnation des utilisateurs dans des corps virtuels [251]. Ainsi, il est indispensable de mener de nouvelles études où des avatars en environnements virtuels (ou des mannequins en environnements distants) devront être utilisés. Cela permettra avant tout d'**évaluer l'impact de la présence de soi et de la présence sociale activée par l'utilisation de tels avatars** [64, 65] sur la sensation de présence spatiale.

De plus, il a été montré que la fidélité de représentation des avatars est un facteur important pour la présence spatiale [7, 1]. Dès lors, une attention particulière devra être accordée à la fidélité de ces avatars dans la représentation des utilisateurs. Un exemple d'étude pourrait être d'évaluer l'effet de la « vallée dérangement » (en anglais, uncanny valley) [279] sur le degré d'émergence de la présence spatiale.

Pour finir, une perspective de nature plus applicative serait d'évaluer la présence spatiale lors de l'exécution de **tâches plus complexes**. Ainsi, nous nous sommes limités dans cette thèse à des tâches « performatives ». Or, une étude future pourrait confronter des utilisateurs à des **tâches « collaboratives »** où ils devraient communiquer entre eux pour réussir une activité. On pourrait également étudier le comportement des utilisateurs lors de **tâches plus « conceptuelles »** comme le suivi d'un cours dans une classe à distance. Pour finir, on pourrait également évaluer l'effet des **tâches « répétitives »**, i.e. où l'utilisateur se trouve dans un système de manière répétée comme les vidéos conférences, sur la présence spatiale.

Toutes ces études permettraient de rendre le modèle présenté dans cette thèse d'autant plus inclusif à différents environnements, à différents systèmes de médiation et à différents contextes d'application. En particulier, ces exemples concrets d'études sont inspirés de la situation de pandémie de Covid-19 survenue pendant la durée de cette thèse. Cette situation est un exemple frappant qui encourage à poursuivre l'étude et l'évaluation de la présence spatiale en environnement virtuel mais surtout en environnement distant.

Acknowledgements

Cette thèse a été partiellement soutenue par RTA Digeo et Labex DigiCosme (Idex Paris-Saclay ANR-11-IDEX-0003-02) et par EquipEx DIGISCOPE (ANR-10-EQPX-26-01) géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), dans le cadre du programme Investissements d'Avenir.

Liste des productions scientifiques

Revue internationale

- **Nawel Khenak**, Jeanne Vézien, and Patrick Bourdot. Spatial Presence, Performance, and Behavior between Real, Remote, and Virtual Immersive Environments. *In IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG)*, Long Paper, 2020. **[Honorable Paper Mention Award]**
- **Nawel Khenak**, Jeanne Vézien, David Théry and Patrick Bourdot. Spatial Presence in Real and Remote Immersive Environments and the Effect of Multisensory Stimulation. *In PRESENCE : Virtual and Augmented Reality*, 27(3), pp. 287-308, Long Paper, 2020.

Conférences internationales

- **Nawel Khenak**, Jeanne Vézien, and Patrick Bourdot. The Construction and Validation of the SP-IE Questionnaire : An Instrument for Measuring Spatial Presence in Immersive Environments. *In the International Conference on Virtual Reality and Augmented Reality (EuroVR)*, pp. 201-225, Long Paper, 2019. **[Lecture Notes in Computer Science 11883, Springer 2019, ISBN 978-3-030-31907-6]**
- **Nawel Khenak**, Jeanne Vézien, and Patrick Bourdot. Spatial Presence in Real and Remote Immersive Environments. *In IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEEVR)*, pp. 1016-1017, Abstract and Poster, 2019.
- **Nawel Khenak**, Jeanne Vézien, and Patrick Bourdot. Toward a Unified Model of Spatial Presence. Long Paper, under review.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] S.-A. A. Jin, "Avatars mirroring the actual self versus projecting the ideal self : The effects of self-priming on interactivity and immersion in an exergame, wii fit," *CyberPsychology & Behavior*, vol. 12, no. 6, pp. 761–765, 2009. <https://doi.org/10.1089/cpb.2009.0130>.
- [2] P. Cazaux, J.-M. Vézien, P. Martin, D. Touraine, N. Férey, and P. Bourdot, "Le système eve : aperçu des recherches en cours en immersion collaborative et en téléopération," 2010.
- [3] N. Cooper, F. Milella, C. Pinto, I. Cant, M. White, and G. Meyer, "The effects of substitute multisensory feedback on task performance and the sense of presence in a virtual reality environment," *PloS one*, vol. 13, no. 2, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191846>.
- [4] C. Maïano, P. Therme, and D. Mestre, "Affective, anxiety and behavioral effects of an aversive stimulation during a simulated navigation task within a virtual environment : A pilot study," *Computers in Human Behavior*, vol. 27, no. 1, pp. 169–175, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.07.020>.
- [5] J.-C. Lepecq, L. Bringoux, J.-M. Pergandi, T. Coyle, and D. Mestre, "Afforded actions as a behavioral assessment of physical presence in virtual environments," *Virtual reality*, vol. 13, no. 3, pp. 141–151, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10055-009-0118-1>.
- [6] M. Meehan, B. Insko, M. Whitton, and F. P. Brooks Jr, "Physiological measures of presence in stressful virtual environments," *Acm transactions on graphics (tog)*, vol. 21, no. 3, pp. 645–652, 2002. <https://doi.org/10.1145/566570.566630>.
- [7] M. Slater, B. Spanlang, and D. Corominas, "Simulating virtual environments within virtual environments as the basis for a psychophysics of presence," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 29, no. 4, pp. 1–9, 2010. <https://doi.org/10.1145/1833351.1778829>.

- [8] I. Bergström, S. Azevedo, P. Papiotis, N. Saldanha, and M. Slater, "The plausibility of a string quartet performance in virtual reality," *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 23, no. 4, pp. 1352–1359, 2017. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2657138>.
- [9] R. Skarbez, S. Neyret, F. P. Brooks, M. Slater, and M. C. Whitton, "A psychophysical experiment regarding components of the plausibility illusion," *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 23, no. 4, pp. 1369–1378, 2017. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2657158>.
- [10] D. Nunez and E. Blake, "A direct comparison of presence levels in text-based and graphics-based virtual environments," in *Proceedings of the 2nd international conference on Computer graphics, virtual Reality, visualisation and interaction in Africa*, pp. 53–56, 2003.
- [11] K.-E. Bystrom, W. Barfield, and C. Hendrix, "A conceptual model of the sense of presence in virtual environments," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 8, no. 2, pp. 241–244, 1999. <https://doi.org/10.1162/105474699566107>.
- [12] W. Wirth, T. Hartmann, S. Böcking, P. Vorderer, C. Klimmt, H. Schramm, T. Saari, J. Laarni, N. Ravaja, F. R. Gouveia, *et al.*, "A process model of the formation of spatial presence experiences," *Media psychology*, vol. 9, no. 3, pp. 493–525, 2007. <https://doi.org/10.1080/15213260701283079>.
- [13] S. Chaffee, "Explication (communication concepts 1)," 1991.
- [14] C. Heeter, "Being there : The subjective experience of presence," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 1, no. 2, pp. 262–271, 1992. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.2.262>.
- [15] T. B. Sheridan, "Musings on telepresence and virtual presence," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 1, no. 1, pp. 120–126, 1992. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.120>.
- [16] W. Barfield and S. Weghorst, "The sense of presence within virtual environments : A conceptual framework," *Advances in Human Factors Ergonomics*, vol. 19, pp. 699–699, 1993.
- [17] M. Slater and S. Wilbur, "A framework for immersive virtual environments (five) : Speculations on the role of presence in virtual environments," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 6, no. 6, pp. 603–616, 1997. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>.
- [18] J. V. Draper, D. B. Kaber, and J. M. Usher, "Telepresence," *Human factors*, vol. 40, no. 3, pp. 354–375, 1998. <https://doi.org/10.1518/001872098779591386>.
- [19] M. V. Sanchez-Vives and M. Slater, "From presence to consciousness through virtual reality," *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 6, no. 4, pp. 332–339, 2005. <https://doi.org/10.1038/nrn1651>.

- [20] R. Heinlein, "Waldo. astounding science fiction," 1942.
- [21] M. Minsky, "Telepresence," 1980.
- [22] D. L. Akin, M. Minsky, E. Thiel, and C. Kurtzman, *Telepresence project applications*, vol. 2. 1983.
- [23] S. Tachi, K. Tanie, K. Komoriya, and M. Kaneko, "Tele-existence (i) : Design and evaluation of a visual display with sensation of presence," in *Theory and Practice of Robots and Manipulators*, pp. 245–254, Springer, 1985. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9882-4_27.
- [24] S. Tachi, H. Arai, and T. Maeda, "Tele-existence master-slave system for remote manipulation. ii," in *29th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 85–90, IEEE, 1990. <https://doi.org/10.1109/CDC.1990.203551>.
- [25] C. L. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, S. Kamuro, K. Minamizawa, S. Tachi, *et al.*, "Design of telesar v for transferring bodily consciousness in telexistence," in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5112–5118, IEEE, 2012. <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385814>.
- [26] C. L. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, K. Hirota, S. Kamuro, K. Sato, K. Minamizawa, and S. Tachi, "Telesar v : Telexistence surrogate anthropomorphic robot," in *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, pp. 1–1, 2012. <https://doi.org/10.1145/2343456.2343479>.
- [27] W. IJsselsteijn, *History of telepresence*, pp. 7–21. United States : Wiley, 2005.
- [28] S. Tachi, K. Minamizawa, M. Furukawa, and C. L. Fernando, "Telexistence—from 1980 to 2012," in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5440–5441, IEEE, 2012. <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6386296>.
- [29] R. M. Held and N. I. Durlach, "Telepresence," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 1, no. 1, pp. 109–112, 1992. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.109>.
- [30] J. Steuer, "Defining virtual reality : Dimensions determining telepresence," *Journal of communication*, vol. 42, no. 4, pp. 73–93, 1992. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x>.
- [31] M. Slater, M. Usoh, and A. Steed, "Depth of presence in virtual environments," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 3, no. 2, pp. 130–144, 1994. <https://doi.org/10.1162/pres.1994.3.2.130>.
- [32] F. Biocca, "The cyborg's dilemma : Progressive embodiment in virtual environments," *Journal of computer-mediated communication*, vol. 3, no. 2, p. JCMC324, 1997. <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00070.x>.
- [33] T. Schubert, F. Friedmann, and H. Regenbrecht, "Embodied presence in virtual environments," in *Visual representations and interpretations*, pp. 269–278, Springer, 1999.

- [34] J. Lessiter, J. Freeman, E. Keogh, and J. Davidoff, "A cross-media presence questionnaire : The itc-sense of presence inventory," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 10, no. 3, pp. 282–297, 2001. <https://doi.org/10.1162/105474601300343612>.
- [35] S. Zhao, "Reconceptualizing presence : Differentiating between mode of presence and sense of presence," in *Proceedings of PRESENCE 2002*, pp. 260–273, Citeseer, 2002.
- [36] R. Skarbez, F. P. Brooks, Jr, and M. C. Whitton, "A survey of presence and related concepts," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 50, no. 6, pp. 1–39, 2017. <https://doi.org/10.1145/3134301>.
- [37] J. Gibson James, "The ecological approach to visual perception," 1979.
- [38] M. Slater and M. Usoh, "Representations systems, perceptual position, and presence in immersive virtual environments," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 2, no. 3, pp. 221–233, 1993. <https://doi.org/10.1162/pres.1993.2.3.221>.
- [39] M. Slater, "Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments," *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, vol. 364, no. 1535, pp. 3549–3557, 2009. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138>.
- [40] B. G. Witmer and M. J. Singer, "Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire," *Presence*, vol. 7, no. 3, pp. 225–240, 1998. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>.
- [41] T. Kim and F. Biocca, "Telepresence via television : Two dimensions of telepresence may have different connections to memory and persuasion.," *Journal of computer-mediated communication*, vol. 3, no. 2, p. JCMC325, 1997. <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00073.x>.
- [42] F. Biocca, "Inserting the presence of mind into a philosophy of presence : A response to sheridan and mantovani and riva," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 10, no. 5, pp. 546–556, 2001. <https://doi.org/10.1162/105474601753132722>.
- [43] C. Sas and G. M. O'Hare, "Presence equation : An investigation into cognitive factors underlying presence," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 12, no. 5, pp. 523–537, 2003. <https://doi.org/10.1162/105474603322761315>.
- [44] P. Zahorik and R. L. Jenison, "Presence as being-in-the-world," *Presence*, vol. 7, no. 1, pp. 78–89, 1998. <https://doi.org/10.1162/105474698565541>.
- [45] J. M. Flach and J. G. Holden, "The reality of experience : Gibson's way," *Presence*, vol. 7, no. 1, pp. 90–95, 1998. <https://doi.org/10.1162/105474698565550>.

- [46] A. Spagnolli and L. Gamberini, "The sense of being 'there' : a model for the space of presence," *EXPLORING THE SENSE OF PRESENCE*, vol. 48, 2004.
- [47] M. Lorenz, M. Busch, L. Rentzos, M. Tscheligi, P. Klimant, and P. Fröhlich, "I'm there! the influence of virtual reality and mixed reality environments combined with two different navigation methods on presence," in *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 223–224, IEEE, 2015. <https://doi.org/10.1109/VR.2015.7223376>.
- [48] M. Busch, M. Lorenz, M. Tscheligi, C. Hochleitner, and T. Schulz, "Being there for real : presence in real and virtual environments and its relation to usability," in *Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction : Fun, Fast, Foundational*, pp. 117–126, 2014. <https://doi.org/10.1145/2639189.2639224>.
- [49] U. Schultze, "Embodiment and presence in virtual worlds : a review," *Journal of Information Technology*, vol. 25, no. 4, pp. 434–449, 2010. <https://doi.org/10.1057/jit.2010.25>.
- [50] D. R. Mestre, "On the usefulness of the concept of presence in virtual reality applications," in *The Engineering Reality of Virtual Reality 2015*, vol. 9392, p. 93920J, International Society for Optics and Photonics, 2015. <https://doi.org/10.1117/12.2075798>.
- [51] M. Lombard and T. Ditton, "At the heart of it all : The concept of presence," *Journal of computer-mediated communication*, vol. 3, no. 2, p. JCMC321, 1997. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10190-3_2.
- [52] J. J. Gibson, *The theory of affordance : The ecological approach to visual perception : classic edition*. Psychology Press, 2014.
- [53] ISPR, "An explication of presence," 2000. <http://ispr.info>.
- [54] L. Floridi, "The philosophy of presence : From epistemic failure to successful observation," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 14, no. 6, pp. 656–667, 2005. <https://doi.org/10.1162/105474605775196553>.
- [55] D. M. Pinchbeck and B. Stevens, "Presence, narrative and schemata," in *Proceedings of Presence 2005 : The 8th International Workshop on Presence*, pp. 221–26, 2005.
- [56] K. M. Lee, "Presence, explicated," *Communication theory*, vol. 14, no. 1, pp. 27–50, 2004. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2885.2004.tb00302.x>.
- [57] N. Durlach and M. Slater, "Presence in shared virtual environments and virtual togetherness," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 9, no. 2, pp. 214–217, 2000. <https://doi.org/10.1162/105474600566736>.

- [58] M. Reiner and D. Hecht, "Behavioral indications of object-presence in haptic virtual environments," *Cyberpsychology & Behavior*, vol. 12, no. 2, pp. 183–186, 2009. <https://doi.org/10.1089/cpb.2008.0141>.
- [59] R. Schroeder, "Being there together and the future of connected presence," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 15, no. 4, pp. 438–454, 2006. <https://doi.org/10.1162/pres.15.4.438>.
- [60] S. E. Power, "Relative and absolute temporal presence," in *Philosophy and Psychology of Time*, pp. 69–100, Springer, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22195-3_5.
- [61] M. L. Price, *Calibrating Reality with a Mind's Mirror Postulate : Towards a Comprehensive Schema for Measuring Personal Presence*. PhD thesis, Fielding Graduate University, 2017.
- [62] P. W. Eastwick and W. L. Gardner, "Is it a game? evidence for social influence in the virtual world," *Social Influence*, vol. 4, no. 1, pp. 18–32, 2009. <https://doi.org/10.1080/15534510802254087>.
- [63] J. P. Gee, "Video games and embodiment," *Games and culture*, vol. 3, no. 3-4, pp. 253–263, 2008. <https://doi.org/10.1177/1555412008317309>.
- [64] U. Schultze and M. M. Leahy, "The avatar-self relationship : Enacting presence in second life," *ICIS 2009 Proceedings*, p. 12, 2009.
- [65] R. Ratan and B. S. Hasler, "Exploring self-presence in collaborative virtual teams.," *PsychNology Journal*, vol. 8, no. 1, 2010.
- [66] J. Short, E. Williams, and B. Christie, *The social psychology of telecommunications*. John Wiley & Sons, 1976.
- [67] L. A. Albertson, "Review essay : Trying to eat an elephant the social psychology of telecommunications, by john short, ederyn williams, and bruce christie. london : John wiley, 1976," *Communication Research*, vol. 7, no. 3, pp. 387–400, 1980. <https://doi.org/10.1177/009365028000700307>.
- [68] F. Biocca, C. Harms, and J. K. Burgoon, "Toward a more robust theory and measure of social presence : Review and suggested criteria," *Presence : Teleoperators & virtual environments*, vol. 12, no. 5, pp. 456–480, 2003. <https://doi.org/10.1162/105474603322761270>.
- [69] J. Blascovich, J. Loomis, A. C. Beall, K. R. Swinth, C. L. Hoyt, and J. N. Bailenson, "Immersive virtual environment technology as a methodological tool for social psychology," *Psychological inquiry*, vol. 13, no. 2, pp. 103–124, 2002. http://dx.doi.org/10.1207/S15327965PLI1302_01.
- [70] T. L. Taylor, "Living digitally : Embodiment in virtual worlds," in *The social life of avatars*, pp. 40–62, Springer, 2002. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0277-9_3.

- [71] X. Wang, J. Laffey, W. Xing, Y. Ma, and J. Stichter, "Exploring embodied social presence of youth with autism in 3d collaborative virtual learning environment : A case study," *Computers in Human Behavior*, vol. 55, pp. 310–321, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.09.006>.
- [72] M. P. McCreery, D. B. Vallett, and C. Clark, "Social interaction in a virtual environment : Examining socio-spatial interactivity and social presence using behavioral analytics," *Computers in Human Behavior*, vol. 51, pp. 203–206, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.04.044>.
- [73] X. Chen, Y. Fang, and B. Lockee, "Integrative review of social presence in distance education : Issues and challenges," *Educational research and reviews*, vol. 10, no. 13, pp. 1796–1806, 2015. <https://doi.org/10.5897/ERR2015.2276>.
- [74] B. Lu, W. Fan, and M. Zhou, "Social presence, trust, and social commerce purchase intention : An empirical research," *Computers in Human Behavior*, vol. 56, pp. 225–237, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.11.057>.
- [75] J. S. Lim, Y. Hwang, S. Kim, and F. A. Biocca, "How social media engagement leads to sports channel loyalty : Mediating roles of social presence and channel commitment," *Computers in Human Behavior*, vol. 46, pp. 158–167, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.01.013>.
- [76] D. W. Schloerb, "A quantitative measure of telepresence," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 4, no. 1, pp. 64–80, 1995.
- [77] L. Muhlbach, M. Bocker, and A. Prussog, "Telepresence in videocommunications : A study on stereoscopy and individual eye contact," *Human Factors*, vol. 37, no. 2, pp. 290–305, 1995. <https://doi.org/10.1518/001872095779064582>.
- [78] C. Hendrix and W. Barfield, "Presence within virtual environments as a function of visual display parameters," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 5, no. 3, pp. 274–289, 1996. <https://doi.org/10.1162/pres.1996.5.3.274>.
- [79] R. H. Taylor, A. Menciassi, G. Fichtinger, P. Fiorini, and P. Dario, "Medical robotics and computer-integrated surgery," in *Springer handbook of robotics*, pp. 1657–1684, Springer, 2016. <https://doi.org/10.1109/TRA.2003.817058>.
- [80] T. Anderson, R. Liam, D. R. Garrison, and W. Archer, "Assessing teaching presence in a computer conferencing context," *Journal of the Asynchronous Learning Network*, 2001. 10.24059/olj.v5i2.1875.
- [81] R. Tamborini and P. Skalski, "The role of presence in the experience of electronic games," *Playing video games : Motives, responses, and consequences*, pp. 225–240, 2006.

- [82] M. C. Juan, R. Baños, C. Botella, D. Pérez, M. Alcaníiz, and C. Monserrat, "An augmented reality system for the treatment of acrophobia : the sense of presence using immersive photography," *Presence : Teleoperators and virtual environments*, vol. 15, no. 4, pp. 393–402, 2006. [10.1162/pres.15.4.393](https://doi.org/10.1162/pres.15.4.393).
- [83] M. J. Schuemie, P. Van Der Straaten, M. Krijn, and C. A. Van Der Mast, "Research on presence in virtual reality : A survey," *CyberPsychology & Behavior*, vol. 4, no. 2, pp. 183–201, 2001. <https://doi.org/10.1089/109493101300117884>.
- [84] W. A. IJsselsteijn, J. Freeman, and H. De Ridder, "Presence : Where are we?," 2001. <https://doi.org/10.1089/109493101300117875>.
- [85] J. Casanueva and E. Blake, "The effects of avatars on co-presence in a collaborative virtual environment," 2001.
- [86] R. B. Welch, T. T. Blackmon, A. Liu, B. A. Mellers, and L. W. Stark, "The effects of pictorial realism, delay of visual feedback, and observer interactivity on the subjective sense of presence," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 5, no. 3, pp. 263–273, 1996. <https://doi.org/10.1162/pres.1996.5.3.263>.
- [87] M. Garau, D. Friedman, H. R. Widenfeld, A. Antley, A. Brogni, and M. Slater, "Temporal and spatial variations in presence : Qualitative analysis of interviews from an experiment on breaks in presence," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 17, no. 3, pp. 293–309, 2008. <https://doi.org/10.1162/pres.17.3.293>.
- [88] C. D. Murray, P. Arnold, and B. Thornton, "Presence accompanying induced hearing loss : Implications for immersive virtual environments," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 9, no. 2, pp. 137–148, 2000. <https://doi.org/10.1162/105474600566682>.
- [89] V. Mollo and P. Falzon, "Auto-and allo-confrontation as tools for reflective activities," *Applied ergonomics*, vol. 35, no. 6, pp. 531–540, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.06.003>.
- [90] X. Rétaux, "Presence and immersion : Different aspect of playability in 3d video games," *Playing with the future. Manchester*, pp. 5–7, 2002.
- [91] J. Freeman and S. E. Avons, "Focus group exploration of presence through advanced broadcast services," in *Human Vision and Electronic Imaging V*, vol. 3959, pp. 530–539, International Society for Optics and Photonics, 2000. <https://doi.org/10.1117/12.387207>.
- [92] M. P. Snow and R. C. Williges, "Empirical models based on free-modulus magnitude estimation of perceived presence in virtual environments," *Human factors*, vol. 40, no. 3, pp. 386–402, 1998. <https://doi.org/10.1518/001872098779591395>.

- [93] J. Freeman, S. E. Avons, D. E. Pearson, and W. A. IJsselsteijn, "Effects of sensory information and prior experience on direct subjective ratings of presence," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 8, no. 1, pp. 1–13, 1999. <https://doi.org/10.1162/105474699566017>.
- [94] M. Slater and A. Steed, "A virtual presence counter," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 9, no. 5, pp. 413–434, 2000. <https://doi.org/10.1162/105474600566925>.
- [95] A. Brogni, M. Slater, and A. Steed, "More breaks less presence," in *Presence 2003 : The 6th Annual International Workshop on Presence*, pp. 1–4, 2003.
- [96] M. Kuschel, F. Freyberger, M. Buss, and B. Färber, "A presence measure for virtual reality and telepresence based on multimodal conflicts," in *Proceedings of PRESENCE 2007 : The 10th Annual International Workshop on Presence*, Citeseer, 2007.
- [97] C. Rosakranse and S. Y. Oh, "Measuring presence : The use trends of five canonical presence questionnaires from 1998–2012," in *Challenging presence : Proceedings of the 15th international conference on presence*, pp. 25–30, 2014.
- [98] M. Usoh, E. Catena, S. Arman, and M. Slater, "Using presence questionnaires in reality," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 9, no. 5, pp. 497–503, 2000. <https://doi.org/10.1162/105474600566989>.
- [99] M. Usoh, K. Arthur, M. C. Whitton, R. Bastos, A. Steed, M. Slater, and F. P. Brooks Jr, "Walking> walking-in-place> flying, in virtual environments," in *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 359–364, 1999. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.086>.
- [100] M. Slater, J. McCarthy, and F. Maringelli, "The influence of body movement on subjective presence in virtual environments," *Human Factors*, vol. 40, no. 3, pp. 469–477, 1998. <https://doi.org/10.1518/001872098779591368>.
- [101] T. Schubert, F. Friedmann, and H. Regenbrecht, "The experience of presence : Factor analytic insights," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 10, no. 3, pp. 266–281, 2001. <https://doi.org/10.1162/105474601300343603>.
- [102] M. Lombard, T. B. Ditton, and L. Weinstein, "Measuring presence : the temple presence inventory," in *Proceedings of the 12th annual international workshop on presence*, pp. 1–15, 2009.
- [103] A. G. Picciano, "Beyond student perceptions : Issues of interaction, presence, and performance in an online course," *Journal of Asynchronous learning networks*, vol. 6, no. 1, pp. 21–40, 2002. <https://doi.org/10.24059/olj.v6i1.1870>.

- [104] I. Poupyrev, S. Weghorst, M. Billingham, and T. Ichikawa, "A framework and testbed for studying manipulation techniques for immersive vr," in *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 21–28, 1997. <https://doi.org/10.1145/261135.261141>.
- [105] A. Sutcliffe, B. Gault, and J.-E. Shin, "Presence, memory and interaction in virtual environments," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 62, no. 3, pp. 307–327, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.11.010>.
- [106] C. Youngblut and O. Huie, "The relationship between presence and performance in virtual environments : Results of a vertx study," in *IEEE Virtual Reality, 2003. Proceedings.*, pp. 277–278, IEEE, 2003. <https://doi.org/10.1109/VR.2003.1191158>.
- [107] M. Slater, "Measuring presence : A response to the witmer and singer presence questionnaire," *Presence*, vol. 8, no. 5, pp. 560–565, 1999. <https://doi.org/10.1162/105474699566477>.
- [108] K. Mania and A. Chalmers, "The effects of levels of immersion on memory and presence in virtual environments : A reality centered approach," *CyberPsychology & Behavior*, vol. 4, no. 2, pp. 247–264, 2001. <https://doi.org/10.1089/109493101300117938>.
- [109] C. J. Jerome and B. G. Witmer, "Human performance in virtual environments : Effects of presence, immersive tendency, and simulator sickness," in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 48, pp. 2613–2617, SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2004. <https://doi.org/10.1177/154193120204602620>.
- [110] B. G. Witmer, J. H. Bailey, B. W. Knerr, and K. C. Parsons, "Virtual spaces and real world places : transfer of route knowledge," *International journal of human-computer studies*, vol. 45, no. 4, pp. 413–428, 1996. <https://doi.org/10.1006/ijhc.1996.0060>.
- [111] J. H. Bailey, "Spatial knowledge acquisition in a virtual environment," 1994.
- [112] B. G. Witmer, W. J. Sadowski, and N. M. Finkelstein, "Ve-based training strategies for acquiring survey knowledge," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 11, no. 1, pp. 1–18, 2002. <https://doi.org/10.1162/105474602317343622>.
- [113] M. J. Singer, *Effect of a body model on performance in a virtual environment search task*, vol. 1087. US Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, 1998. <https://doi.org/10.21236/ada352026>.
- [114] M. J. Singer, S. C. Grant, P. M. Commarford, J. P. Kring, and M. Zavod, "Team performance in distributed virtual environments," tech. rep., ARMY RESEARCH INST FOR THE BEHAVIORAL AND SOCIAL SCIENCES ALEXANDRIA VA, 2001.

- [115] K. M. Stanney, K. S. Kingdon, D. Graeber, and R. S. Kennedy, "Human performance in immersive virtual environments : Effects of exposure duration, user control, and scene complexity," *Human performance*, vol. 15, no. 4, pp. 339–366, 2002. https://doi.org/10.1207/S15327043HUP1504_03.
- [116] J. A. Stevens, J. P. Kincaid, *et al.*, "The relationship between presence and performance in virtual simulation training," *Open Journal of Modelling and Simulation*, vol. 3, no. 02, p. 41, 2015.
- [117] E. B. Nash, G. W. Edwards, J. A. Thompson, and W. Barfield, "A review of presence and performance in virtual environments," *International Journal of human-computer Interaction*, vol. 12, no. 1, pp. 1–41, 2000. https://doi.org/10.1207/S15327590IJHC1201_1.
- [118] B. W. Knerr, D. R. Lampton, M. J. Singer, B. G. Witmer, and S. L. Goldberg, "Virtual environments for dismounted soldier training and performance : Results, recommendations, and issues.," tech. rep., ARMY RESEARCH INST FIELD UNIT ORLANDO FL, 1998.
- [119] J. J. Cummings and J. N. Bailenson, "How immersive is enough? a meta-analysis of the effect of immersive technology on user presence," *Media Psychology*, vol. 19, no. 2, pp. 272–309, 2016. <https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015740>.
- [120] B. Laha, K. Sensharma, J. D. Schiffbauer, and D. A. Bowman, "Effects of immersion on visual analysis of volume data," *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 18, no. 4, pp. 597–606, 2012. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2012.42>.
- [121] P. Dalley, B. Robinson, J. Weller, and C. Caldwell, "The use of high-fidelity human patient simulation and the introduction of new anesthesia delivery systems," *Anesthesia & Analgesia*, vol. 99, no. 6, pp. 1737–1741, 2004. <https://doi.org/10.1213/01.ANE.0000136804.46675.EA>.
- [122] R. P. McMahan, D. Gorton, J. Gresock, W. McConnell, and D. A. Bowman, "Separating the effects of level of immersion and 3d interaction techniques," in *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 108–111, 2006. <https://doi.org/10.1145/1180495.1180518>.
- [123] D. Carvalho, M. Bessa, and L. Magalhães, "Different interaction paradigms for different user groups : an evaluation regarding content selection," in *Proceedings of the XV international conference on human computer interaction*, pp. 1–6, 2014. <https://doi.org/10.1145/2662253.2662293>.
- [124] M. Slater, "A note on presence terminology," *Presence connect*, vol. 3, no. 3, pp. 1–5, 2003.
- [125] G. Riva and F. Mantovani, "From the body to the tools and back : a general framework for presence in mediated interactions," *Interacting with Computers*, vol. 24, no. 4, pp. 203–210, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2012.04.007>.

- [126] H. T. Regenbrecht, T. W. Schubert, and F. Friedmann, "Measuring the sense of presence and its relations to fear of heights in virtual environments," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 10, no. 3, pp. 233–249, 1998. https://doi.org/10.1207/s15327590ijhc1003_2.
- [127] L. Laux, P. Glanzmann, P. Schaffner, and C. D. Spielberger, "Das state-trait-angstinventar [the state-trait anxiety inventory]," *Hogrefe, Göttingen (in German)*, 1981.
- [128] J. Freeman, S. E. Avons, R. Meddis, D. E. Pearson, and W. IJsselsteijn, "Using behavioral realism to estimate presence : A study of the utility of postural responses to motion stimuli," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 9, no. 2, pp. 149–164, 2000. <https://doi.org/10.1162/105474600566691>.
- [129] J. N. Bailenson, J. Blascovich, A. C. Beall, and J. M. Loomis, "Interpersonal distance in immersive virtual environments," *Personality and social psychology bulletin*, vol. 29, no. 7, pp. 819–833, 2003. <https://doi.org/10.1177/0146167203029007002>.
- [130] J. D. Prothero, D. E. Parker, T. Furness, and M. Wells, "Towards a robust, quantitative measure for presence," in *Proceedings of the conference on Experimental Analysis and Measurement of Situation Awareness*, pp. 359–366, 1995.
- [131] C. Bracken, G. Pettey, and M. Wu, "Telepresence and attention : Secondary task reaction time and media form," *Proc. Int. Soc. Presence*, 2011.
- [132] C. C. Bracken, G. Pettey, and M. Wu, "Revisiting the use of secondary task reaction time measures in telepresence research : exploring the role of immersion and attention," *AI & society*, vol. 29, no. 4, pp. 533–538, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00146-013-0494-7>.
- [133] C. Dillon, E. Keogh, and J. Freeman, "It's been emotional' : Affect, physiology, and presence," in *Proceedings of the Fifth Annual International Workshop on Presence, Porto, Portugal*, 2002.
- [134] C. Dillon, E. Keogh, J. Freeman, and J. Davidoff, "Aroused and immersed : the psychophysiology of presence," in *Proceedings of 3rd International Workshop on Presence, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands*, pp. 27–28, 2000.
- [135] M. Meehan, S. Razzaque, B. Insko, M. Whitton, and F. P. Brooks, "Review of four studies on the use of physiological reaction as a measure of presence in stressful virtual environments," *Applied psychophysiology and biofeedback*, vol. 30, no. 3, pp. 239–258, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10484-005-6381-3>.
- [136] M. Slater, C. Guger, G. Edlinger, R. Leeb, G. Pfurtscheller, A. Antley, M. Garau, A. Brogni, and D. Friedman, "Analysis of physiological responses to a social situation in an immersive virtual environment," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 15, no. 5, pp. 553–569, 2006. <https://doi.org/10.1162/pres.15.5.553>.

- [137] M. Slater, A. Brogni, and A. Steed, "Physiological responses to breaks in presence : A pilot study," in *Presence 2003 : The 6th annual international workshop on presence*, vol. 157, Citeseer, 2003.
- [138] T. Baumgartner, D. Speck, D. Wettstein, O. Masnari, G. Beeli, and L. Jäncke, "Feeling present in arousing virtual reality worlds : prefrontal brain regions differentially orchestrate presence experience in adults and children," *Frontiers in human neuroscience*, vol. 2, p. 8, 2008. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.008.2008>.
- [139] S. Bouchard, J. Talbot, A.-A. Ledoux, J. Phillips, M. Cantamasse, and G. Robillard, "Presence is just an illusion : using fmri to locate the brain area responsible to the meaning given to places," *Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine : Advanced Technologies in the Behavioral, Social, and Neurosciences. 2010*, vol. 154, pp. 193–196, 2010.
- [140] S. Bouchard, J. Talbot, A.-A. Ledoux, J. Phillips, M. Cantamasse, and G. Robillard, "The meaning of being there is related to a specific activation in the brain located in the parahypocampus," *Proceedings of PRESENCE*, 2009.
- [141] M. Clemente, A. Rodríguez, B. Rey, A. Rodríguez, R. M. Baños, C. Botella, M. Alcañiz, and C. Ávila, "Analyzing the level of presence while navigating in a virtual environment during an fmri scan," in *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 475–478, Springer, 2011. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23768-3_61.
- [142] S. Bouchard, S. Dumoulin, J. Talbot, A.-A. Ledoux, J. Phillips, J. Monthuy-Blanc, G. Labonté-Chartrand, G. Robillard, M. Cantamesse, and P. Renaud, "Manipulating subjective realism and its impact on presence : Preliminary results on feasibility and neuroanatomical correlates," *Interacting with Computers*, vol. 24, no. 4, pp. 227–236, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2012.04.011>.
- [143] J. Freeman, J. Lessiter, K. Pugh, and E. Keogh, "When presence and emotion are related, and when they are not," in *Proceedings of the 8th annual international workshop on presence (PRESENCE 2005)*, pp. 213–219, International Society for Presence Research, 2005.
- [144] E. Nalivaiko, S. L. Davis, K. L. Blackmore, A. Vakulin, and K. V. Nesbitt, "Cybersickness provoked by head-mounted display affects cutaneous vascular tone, heart rate and reaction time," *Physiology & behavior*, vol. 151, pp. 583–590, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.08.043>.
- [145] R. Skarbez, "Plausibility illusion in virtual environments," 2016.
- [146] A. S. Azevedo, J. Jorge, and P. Campos, "Combining eeg data with place and plausibility responses as an approach to measuring presence in outdoor virtual environments," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 23, no. 4, pp. 354–368, 2014. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00205.
- [147] A. S. Azevedo, "3d sound enhanced presence in virtual environments," *PhD thesis, Master's thesis*, 2013.

- [148] J. Brade, M. Lorenz, M. Busch, N. Hammer, M. Tscheligi, and P. Klimant, "Being there again—presence in real and virtual environments and its relation to usability and user experience using a mobile navigation task," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 101, pp. 76–87, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2017.01.004>.
- [149] K. Mania, "Connections between lighting impressions and presence in real and virtual environments : an experimental study," in *Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics, virtual reality and visualisation*, pp. 119–123, 2001. <https://doi.org/10.1145/513867.513893>.
- [150] P. Milgram and F. Kishino, "A taxonomy of mixed reality visual displays," *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, vol. 77, no. 12, pp. 1321–1329, 1994.
- [151] K. Stanney and G. Salvendy, "Aftereffects and sense of presence in virtual environments : Formulation of a research and development agenda," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 10, no. 2, pp. 135–187, 1998. https://doi.org/10.1207/s15327590ijhc1002_3.
- [152] H. Regenbrecht and T. Schubert, "Measuring presence in augmented reality environments : design and a first test of a questionnaire," *Porto, Portugal*, 2002.
- [153] B. Goldiez and J. W. Dawson, "Is presence present in augmented reality systems," in *Proceedings of Presence 2004. VII. International Workshop on Presence*, pp. 294–297, 2004.
- [154] P. V. Schaik, T. Turnbull, A. V. Wersch, and S. Drummond, "Presence within a mixed reality environment," *CyberPsychology & Behavior*, vol. 7, no. 5, pp. 540–552, 2004. <https://doi.org/10.1089/cpb.2004.7.540>.
- [155] I. Wagner, W. Broll, G. Jacucci, K. Kuutii, R. McCall, A. Morrison, D. Schmalstieg, and J.-J. Terrin, "On the role of presence in mixed reality," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 18, no. 4, pp. 249–276, 2009. <https://doi.org/10.1162/pres.18.4.249>.
- [156] P. Vorderer, W. Wirth, F. R. Gouveia, F. Biocca, T. Saari, L. Jäncke, S. Böcking, H. Schramm, A. Gysbers, T. Hartmann, *et al.*, "Mec spatial presence questionnaire," *Retrieved Sept*, vol. 18, p. 2015, 2004.
- [157] T. W. Schubert, "A new conception of spatial presence : Once again, with feeling," *Communication Theory*, vol. 19, no. 2, pp. 161–187, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2885.2009.01340.x>.
- [158] J. A. Waterworth, E. L. Waterworth, G. Riva, and F. Mantovani, "Presence : Form, content and consciousness," in *Immersed in Media*, pp. 35–58, Springer, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10190-3_3.
- [159] S. Lee, G. J. Kim, A. Rizzo, and H. Park, "Formation of spatial presence : By form or content?," in *Proceedings of the 7th international workshop on presence*, pp. 20–27, 2004.

- [160] R. Held and N. Durlach, "Telepresence, time delay, and adaptation," *Pictorial communication in virtual and real environments*, 1989.
- [161] T. A. Stoffregen, B. G. Bardy, L. Smart, and R. Pagulayan, "On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments," *Virtual and adaptive environments : Applications, implications, and human performance issues*, pp. 111–128, 2003. <https://doi.org/10.1201/9781410608888.ch6>.
- [162] S. Noël, S. Dumoulin, T. Whalen, M. Ward, J. A. Stewart, and E. Lee, "A breeze enhances presence in a virtual environment," in *The 3rd IEEE International Workshop on Haptic, Audio and Visual Environments and Their Applications*, pp. 63–68, IEEE, 2004. <https://doi.org/10.1109/HAVE.2004.1391883>.
- [163] H. Regenbrecht and T. Schubert, "Real and illusory interactions enhance presence in virtual environments," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 11, no. 4, pp. 425–434, 2002. <https://doi.org/10.1162/105474602760204318>.
- [164] D. Zeltzer, "Autonomy, interaction, and presence," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 1, no. 1, pp. 127–132, 1992. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.127>.
- [165] L. Rebenitsch and C. Owen, "Review on cybersickness in applications and visual displays," *Virtual Reality*, vol. 20, no. 2, pp. 101–125, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0285-9>.
- [166] Y. Ling, H. T. Nefs, W.-P. Brinkman, C. Qu, and I. Heynderickx, "The relationship between individual characteristics and experienced presence," *Computers in Human Behavior*, vol. 29, no. 4, pp. 1519–1530, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.12.010>.
- [167] W. Barfield, K. M. Baird, and O. J. Bjorneseth, "Presence in virtual environments as a function of type of input device and display update rate," *Displays*, vol. 19, no. 2, pp. 91–98, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0141-9382\(98\)00041-9](https://doi.org/10.1016/S0141-9382(98)00041-9).
- [168] M. Heidegger, "Basic writings : from being and time (1927) to the task of thinking (1964)," 1977.
- [169] R. B. Welch, "How can we determine if the sense of presence affects task performance?," *Presence*, vol. 8, no. 5, pp. 574–577, 1999. <https://doi.org/10.1162/105474699566387>.
- [170] G. Mantovani and G. Riva, "Building a bridge between different scientific communities : On sheridan's eclectic ontology of presence," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 10, no. 5, pp. 537–543, 2001. <https://doi.org/10.1162/105474601753132704>.
- [171] G. Riva, J. A. Waterworth, E. L. Waterworth, and F. Mantovani, "From intention to action : The role of presence," *New Ideas in Psychology*, vol. 29, no. 1, pp. 24–37, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.newideapsych.2009.11.002>.

- [172] A. Carassa, F. Morganti, and M. Tirassa, "A situated cognition perspective on presence," in *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, vol. 27, 2005.
- [173] A. Haans and W. A. Ijsselsteijn, "Embodiment and telepresence : Toward a comprehensive theoretical framework," *Interacting with Computers*, vol. 24, no. 4, pp. 211–218, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2012.04.010>.
- [174] R. M. Baños, C. Botella, A. Garcia-Palacios, H. Villa, C. Perpiñá, and M. Alcaniz, "Presence and reality judgment in virtual environments : a unitary construct?," *CyberPsychology & Behavior*, vol. 3, no. 3, pp. 327–335, 2000. <https://doi.org/10.1089/10949310050078760>.
- [175] T. W. Schubert, "The sense of presence in virtual environments : A three-component scale measuring spatial presence, involvement, and realness.," *Z. für Medienpsychologie*, vol. 15, no. 2, pp. 69–71, 2003. <https://doi.org/10.1026//1617-6383.15.2.69>.
- [176] S. B. Gilbert, "Perceived realism of virtual environments depends on authenticity," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 24, no. 4, pp. 322–324, 2017. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00276.
- [177] M. T. Palmer, "Interpersonal communication and virtual reality : Mediating interpersonal relationships," *Communication in the age of virtual reality*, pp. 277–299, 1995.
- [178] D. Jacobson, "On theorizing presence," *Journal of Virtual Environments*, vol. 6, no. 1, pp. 1–8, 2002.
- [179] E.-L. Salinäs, "Collaboration in multi-modal virtual worlds : comparing touch, text, voice and video," in *The social life of avatars*, pp. 172–187, Springer, 2002. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0277-9_10.
- [180] N. N. Holland, "The willing suspension of disbelief : A neuro-psychoanalytic view.," *PsyArt*, 2003.
- [181] S. E. Worth, "Fictional spaces," in *The Philosophical Forum*, vol. 35, pp. 439–455, Blackwell Publishing Ltd. Oxford, UK and Malden, USA, 2004. <https://doi.org/10.1111/j.0031-806X.2004.00184.x>.
- [182] M. Epure and E. Lafuente, "Monitoring bank performance in the presence of risk," *Journal of Productivity Analysis*, vol. 44, no. 3, pp. 265–281, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11123-014-0413-z>.
- [183] M. McLuhan and M. A. MCLUHAN, *Understanding media : The extensions of man*. MIT press, 1994.
- [184] T. B. Sheridan, "Descartes, heidegger, gibson, and god : toward an eclectic ontology of presence," *Presence*, vol. 8, no. 5, pp. 551–559, 1999. <https://doi.org/10.1162/105474699566468>.
- [185] M. Lombard, F. Biocca, J. Freeman, W. IJsselsteijn, and R. J. Schaevitz, *Immersed in media : Telepresence theory, measurement & technology*. Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10190-3>.

- [186] C. Hendrix and W. Barfield, "The sense of presence within auditory virtual environments," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 5, no. 3, pp. 290–301, 1996. <https://doi.org/10.1162/pres.1996.5.3.290>.
- [187] M. Slater, V. Linakis, M. Usoh, and R. Kooper, "Immersion, presence and performance in virtual environments : An experiment with tri-dimensional chess," in *Proceedings of the ACM symposium on virtual reality software and technology*, pp. 163–172, 1996. <https://doi.org/10.1145/3304181.3304216>.
- [188] M. Slater, "Presence and the sixth sense," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 11, no. 4, pp. 435–439, 2002. <https://doi.org/10.1162/105474602760204327>.
- [189] "Gestalt," <http://glossaire.infowebmaster.fr/gestalt/#:~:text=lettre%20G%20%3E%20Gestalt-,Gestalt,addition%20ou%20soustraction%20d'%C3%A9l%C3%A9ment.>
- [190] T. P. McNamara, "Mental representations of spatial relations," *Cognitive psychology*, vol. 18, no. 1, pp. 87–121, 1986. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(86\)90016-2](https://doi.org/10.1016/0010-0285(86)90016-2).
- [191] M. Rinck, A. Hähnel, G. H. Bower, and U. Glowalla, "The metrics of spatial situation models," *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, vol. 23, no. 3, p. 622, 1997. <https://doi.org/10.1037//0278-7393.23.3.622>.
- [192] J. S. Bruner and L. Postman, "On the perception of incongruity : A paradigm," *Journal of personality*, vol. 18, no. 2, pp. 206–223, 1949. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6494.1949.tb01241.x>.
- [193] F. Biocca and B. Delaney, "Immersive virtual reality technology," *Communication in the age of virtual reality*, vol. 15, p. 32, 1995. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78414-4_85.
- [194] W. A. IJsselsteijn, H. De Ridder, J. Freeman, and S. E. Avons, "Presence : concept, determinants, and measurement," in *Human vision and electronic imaging V*, vol. 3959, pp. 520–529, International Society for Optics and Photonics, 2000. <https://doi.org/10.1117/12.387188>.
- [195] J. J. LaViola Jr, "A discussion of cybersickness in virtual environments," *ACM Sigchi Bulletin*, vol. 32, no. 1, pp. 47–56, 2000.
- [196] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, T. A. DeFanti, R. V. Kenyon, and J. C. Hart, "The cave : audio visual experience automatic virtual environment," *Communications of the ACM*, vol. 35, no. 6, pp. 64–73, 1992. <https://doi.org/10.1145/129888.129892>.
- [197] M. Slater, A. Antley, A. Davison, D. Swapp, C. Guger, C. Barker, N. Pistrang, and M. V. Sanchez-Vives, "A virtual reprise of the stanley milgram obedience experiments," *PloS one*, vol. 1, no. 1, 2006. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000039>.

- [198] C. L. Fernando, M. Furukawa, K. Minamizawa, and S. Tachi, "Experiencing ones own hand in telexistence manipulation with a 15 dof anthropomorphic robot hand and a flexible master glove," in *2013 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT)*, pp. 20–27, IEEE, 2013. <https://doi.org/10.1109/ICAT.2013.6728901>.
- [199] D. R. Mestre, C. Mañano, V. Dagonneau, and C.-S. Mercier, "Does virtual reality enhance exercise performance, enjoyment, and dissociation ? an exploratory study on a stationary bike apparatus," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 20, no. 1, pp. 1–14, 2011. https://doi.org/10.1162/pres_a_00031.
- [200] M. B. Shenai, M. Dillavou, C. Shum, D. Ross, R. S. Tubbs, A. Shih, and B. L. Guthrie, "Virtual interactive presence and augmented reality (vipar) for remote surgical assistance," *Operative Neurosurgery*, vol. 68, no. suppl_1, pp. ons200–ons207, 2011. <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e3182077efd>.
- [201] R. O. Ambrose, H. Aldridge, R. S. Askew, R. R. Burrige, W. Bluethmann, M. Diftler, C. Lovchik, D. Magruder, and F. Rehnmark, "Robonaut : Nasa's space humanoid," *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, vol. 15, no. 4, pp. 57–63, 2000. <https://doi.org/10.1109/5254.867913>.
- [202] S. Lichiardopol, "A survey on teleoperation," *Technische Universitat Eindhoven, DCT report*, vol. 20, pp. 40–60, 2007.
- [203] R. McCall, S. O'Neil, and F. Carroll, "Measuring presence in virtual environments," in *CHI'04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 783–784, 2004.
- [204] D. A. Bowman and R. P. McMahan, "Virtual reality : how much immersion is enough?," *Computer*, vol. 40, no. 7, pp. 36–43, 2007. <https://doi.org/10.1109/MC.2007.257>.
- [205] K. Yamaashi, J. R. Cooperstock, T. Narine, and W. Buxton, "Beating the limitations of camera-monitor mediated telepresence with extra eyes," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 50–57, 1996. <https://doi.org/10.1145/238386.238402>.
- [206] M. Radi, A. Reiter, S. Zaidan, G. Reinhart, V. Nitsch, and B. Färber, "Telepresence in industrial applications : implementation issues for assembly tasks," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 19, no. 5, pp. 415–429, 2010.
- [207] J. L. Mosso Vázquez, D. Mosso Lara, J. L. Mosso Lara, I. Miller, M. D. Wiederhold, and B. K. Wiederhold, "Pain distraction during ambulatory surgery : virtual reality and mobile devices," *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, vol. 22, no. 1, pp. 15–21, 2019.
- [208] P. Larsson, D. Västfjäll, P. Olsson, and M. Kleiner, "When what you hear is what you see : Presence and auditory-visual integration in virtual environments," in *Proceedings of the 10th annual international workshop on presence*, pp. 11–18, 2007.

- [209] P. M. Fitts, "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement.," *Journal of experimental psychology*, vol. 47, no. 6, p. 381, 1954. <https://doi.org/10.1037/h0055392>.
- [210] M. Akamatsu, I. S. MacKenzie, and T. Hasbroucq, "A comparison of tactile, auditory, and visual feedback in a pointing task using a mouse-type device," *Ergonomics*, vol. 38, no. 4, pp. 816–827, 1995. <https://doi.org/10.1080/00140139508925152>.
- [211] H. Bahu, T. Carpentier, M. Noisternig, and O. Warusfel, "Comparison of different egocentric pointing methods for 3d sound localization experiments," *Acta acustica united with Acustica*, vol. 102, no. 1, pp. 107–118, 2016. <https://doi.org/10.3813/AAA.918928>.
- [212] A. Murata and H. Iwase, "Extending fitts' law to a three-dimensional pointing task," *Human movement science*, vol. 20, no. 6, pp. 791–805, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(01\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(01)00058-6).
- [213] I. Belkacem, I. Pecci, and B. Martin, "Pointing task on smart glasses : Comparison of four interaction techniques," *arXiv preprint arXiv :1905.05810*, 2019.
- [214] A. U. Batmaz, M. D. B. Machuca, D. M. Pham, and W. Stuerzlinger, "Do head-mounted display stereo deficiencies affect 3d pointing tasks in ar and vr?," in *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 585–592, IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/VR.2019.8797975>.
- [215] N. Katzakis, L. Chen, R. J. Teather, O. Ariza, and F. Steinicke, "Evaluation of 3d pointing accuracy in the fovea and periphery in immersive head-mounted display environments," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2019. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2019.2947504>.
- [216] M. Raynal, E. Dubois, and B. Schmitt, "Towards unification for pointing task evaluation in 3d desktop virtual environment," in *International Conference on Human Factors in Computing and Informatics*, pp. 562–580, Springer, 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-39062-3_35.
- [217] T. Carpentier, M. Noisternig, and O. Warusfel, "Twenty years of ircam spat : looking back, looking forward," 2015.
- [218] M. Noisternig, T. Musil, A. Sontacchi, and R. Holdrich, "3d binaural sound reproduction using a virtual ambisonic approach," in *IEEE International Symposium on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems, 2003. VECIMS'03. 2003*, pp. 174–178, IEEE, 2003. <https://doi.org/10.1109/VECIMS.2003.1227050>.
- [219] O. Herbort and W. Kunde, "Spatial (mis-) interpretation of pointing gestures to distal referents.," *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, vol. 42, no. 1, p. 78, 2016. <https://doi.org/10.1037/xhp0000126>.

- [220] B. N. Postma and B. F. Katz, "Perceptive and objective evaluation of calibrated room acoustic simulation auralizations," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 140, no. 6, pp. 4326–4337, 2016. <https://doi.org/10.1121/1.4971422>.
- [221] S. D. Lipscomb, "Cross-modal integration : Synchronization of auditory and visual components in simple and complex media," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, no. 2, p. 1274, 1999. <https://doi.org/10.1121/1.426089>.
- [222] M. Lee, M. Billinghamurst, W. Baek, R. Green, and W. Woo, "A usability study of multimodal input in an augmented reality environment," *Virtual Reality*, vol. 17, no. 4, pp. 293–305, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10055-009-0118-1>.
- [223] D. S. Tan, D. Gergle, P. Scupelli, and R. Pausch, "Physically large displays improve performance on spatial tasks," *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, vol. 13, no. 1, pp. 71–99, 2006. <https://doi.org/10.1145/1143518.1143521>.
- [224] D. Medeiros, R. K. dos Anjos, D. Mendes, J. M. Pereira, A. Raposo, and J. Jorge, "Keep my head on my shoulders! why third-person is bad for navigation in vr," in *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 1–10, 2018. <https://doi.org/10.1145/3281505.3281511>.
- [225] N. Khenak, J. Vézien, D. Théry, and P. Bourdot, "Spatial presence in real and remote immersive environments and the effect of multisensory stimulation," *PRESENCE : Virtual and Augmented Reality*, vol. 27, no. 3, pp. 287–308, 2020. https://doi.org/10.1162/pres_a_00332.
- [226] N. Khenak, J.-M. Vezien, D. They, and P. Bourdot, "Spatial presence in real and remote immersive environments," in *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 1016–1017, IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/VR.2019.8797801>.
- [227] P. Martin, N. Férey, C. Clavel, F. Darses, and P. Bourdot, "Sensorimotor feedback for interactive realism : Evaluation of a haptic driving paradigm for a forklift simulator," in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 314–325, Springer, 2012.
- [228] J. Vasconcelos-Raposo, M. Bessa, M. Melo, L. Barbosa, R. Rodrigues, C. M. Teixeira, L. Cabral, and A. A. Sousa, "Adaptation and validation of the igroup presence questionnaire (ipq) in a portuguese sample," *Presence : Teleoperators and virtual environments*, vol. 25, no. 3, pp. 191–203, 2016. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00261.
- [229] D. Chouaniere, M. Cassitto, A. Spurgeon, A. Verdier, and R. Gilioli, "An international questionnaire to explore neurotoxic symptoms," *Environmental research*, vol. 73, no. 1-2, pp. 70–72, 1997.

- [230] B. G. Witmer, C. J. Jerome, and M. J. Singer, "The factor structure of the presence questionnaire," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 14, no. 3, pp. 298–312, 2005. <https://doi.org/10.1162/105474605323384654>.
- [231] R. P. Robillard G., Bouchard S. and L. Cournoyer, "Validation canadienne-française de deux mesures importantes en réalité virtuelle : l'immersive tendencies questionnaire et le presence questionnaire," 2002. http://w3.uqo.ca/cyberpsy/wp-content/uploads/2019/04/QEP_vf.pdf.
- [232] A. Gorini, C. S. Capideville, G. De Leo, F. Mantovani, and G. Riva, "The role of immersion and narrative in mediated presence : the virtual hospital experience," *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, vol. 14, no. 3, pp. 99–105, 2011. <https://doi.org/10.1089/cyber.2010.0100>.
- [233] A. Tang, F. Biocca, and L. Lim, "Comparing differences in presence during social interaction in augmented reality versus virtual reality environments : An exploratory study," *Proceedings of PRESENCE*, pp. 204–208, 2004.
- [234] A. S. Carlin, H. G. Hoffman, and S. Weghorst, "Virtual reality and tactile augmentation in the treatment of spider phobia : a case report," *Behaviour research and therapy*, vol. 35, no. 2, pp. 153–158, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0005-7967\(96\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0005-7967(96)00085-X).
- [235] S. R. Ellis, N. S. Dorigi, B. M. Menges, B. D. Adelstein, and R. H. Jacoby, "In search of equivalence classes in subjective scales of reality," *Advances in human factors/ergonomics*, vol. 21, pp. 873–876, 1997.
- [236] J. Towell and E. Towell, "Presence in text-based networked virtual environments or "muds"," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 6, no. 5, pp. 590–595, 1997. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.5.590>.
- [237] I. Viaud-Delmo, "Igroup presence questionnaire (ipq) item download." <http://www.igroup.org/pq/ipq/IPQinstructionsFr.doc>.
- [238] A. Bouletreau, D. Chouanière, J. Fontana, *et al.*, "Concevoir, traduire et valider un questionnaire. a propos d'un exemple, euroquest." tech. rep., INRS, 1999.
- [239] F. Guillemin, C. Bombardier, and D. Beaton, "Cross-cultural adaptation of health-related quality of life measures : literature review and proposed guidelines," *Journal of clinical epidemiology*, vol. 46, no. 12, pp. 1417–1432, 1993.
- [240] R. W. Brislin, "Back-translation for cross-cultural research," *Journal of cross-cultural psychology*, vol. 1, no. 3, pp. 185–216, 1970. <https://doi.org/10.1177/135910457000100301>.
- [241] R. K. Hambleton and A. L. Zenisky, "Translating and adapting tests for cross-cultural assessments.," 2011. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511779381.004>.

- [242] J. Cottraux, *Méthodes et échelles d'évaluation des comportements*. EAP, 1985.
- [243] J. Coste, J. Fermanian, and A. Venot, "Methodological and statistical problems in the construction of composite measurement scales : a survey of six medical and epidemiological journals," *Statistics in medicine*, vol. 14, no. 4, pp. 331–345, 1995.
- [244] J. Fermanian, "Évaluer correctement la validité d'une échelle : les nombreux pièges à éviter," *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, vol. 44, no. 3, pp. 278–286, 1996.
- [245] A. E. R. Association, A. P. Association, N. C. on Measurement in Education, J. C. on Standards for Educational, and P. T. (US), *Standards for educational and psychological testing*. Amer Educational Research Assn, 1999.
- [246] L. Moret, J. Chwalow, and C. Baudoin-Balleur, "Évaluer la qualité de la vie : construction d'une échelle," *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, vol. 41, no. 1, pp. 65–71, 1993.
- [247] P. M. Bentler and D. G. Bonett, "Significance tests and goodness of fit in the analysis of covariance structures.," *Psychological bulletin*, vol. 88, no. 3, p. 588, 1980. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.88.3.588>.
- [248] M. Meehan, S. Razzaque, M. C. Whitton, and F. P. Brooks, "Effect of latency on presence in stressful virtual environments," in *IEEE Virtual Reality, 2003. Proceedings.*, pp. 141–148, IEEE, 2003. <https://doi.org/10.1109/VR.2003.1191132>.
- [249] M. Slater, A. Sadagic, M. Usoh, and R. Schroeder, "Small-group behavior in a virtual and real environment : A comparative study," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 9, no. 1, pp. 37–51, 2000. <https://doi.org/10.1162/105474600566600>.
- [250] S. Thie and J. Wijk, "A general theory on presence : Experimental evaluation of social virtual presence in a decision making task," in *presence in shared virtual environments Workshop*, vol. 1, 1998.
- [251] K. L. Nowak and F. Biocca, "The effect of the agency and anthropomorphism on users' sense of telepresence, copresence, and social presence in virtual environments," *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 12, no. 5, pp. 481–494, 2003. <https://doi.org/10.1162/105474603322761289>.
- [252] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, and M. G. Lilienthal, "Simulator sickness questionnaire : An enhanced method for quantifying simulator sickness," *The international journal of aviation psychology*, vol. 3, no. 3, pp. 203–220, 1993. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3.
- [253] D. Bertram, "Likert scales," *Retrieved November*, vol. 2, p. 2013, 2007. <https://doi.org/10.12691/education-5-9-2>.

- [254] F. Stormer, T. Kline, and S. Goldenberg, "Measuring entrepreneurship with the general enterprising tendency (get) test : criterion-related validity and reliability," *Human Systems Management*, vol. 18, no. 1, pp. 47–52, 1999.
- [255] B. Rammstedt and C. Beierlein, "Can't we make it any shorter?," *Journal of Individual Differences*, 2014. <https://doi.org/10.1027/1614-0001/a000141>.
- [256] J. Raubenheimer, "An item selection procedure to maximize scale reliability and validity," *SA Journal of Industrial Psychology*, vol. 30, no. 4, pp. 59–64, 2004. <https://doi.org/10.4102/sajip.v30i4.168>.
- [257] B. M. Byrne and S. M. Stewart, "Teacher's corner : The macs approach to testing for multigroup invariance of a second-order structure : A walk through the process," *Structural equation modeling*, vol. 13, no. 2, pp. 287–321, 2006. https://doi.org/10.1207/s15328007sem1302_7.
- [258] L.-t. Hu and P. M. Bentler, "Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis : Conventional criteria versus new alternatives," *Structural equation modeling : a multidisciplinary journal*, vol. 6, no. 1, pp. 1–55, 1999. <https://doi.org/10.1080/10705519909540118>.
- [259] L. Ding, W. F. Velicer, and L. L. Harlow, "Effects of estimation methods, number of indicators per factor, and improper solutions on structural equation modeling fit indices," *Structural Equation Modeling : A Multidisciplinary Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 119–143, 1995. <https://doi.org/10.1080/10705519509540000>.
- [260] J. L. Horn, "A rationale and test for the number of factors in factor analysis," *Psychometrika*, vol. 30, no. 2, pp. 179–185, 1965. <https://doi.org/10.1007/BF02289447>.
- [261] A. Field, *Discovering statistics using SPSS*. Sage, 2009.
- [262] L. L. Thurstone, "Multiple-factor analysis; a development and expansion of the vectors of mind.," 1947.
- [263] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, R. E. Anderson, and R. Tatham, "Multivariate data analysis : Pearson education," *New Jersey : Hoboken*, 2006.
- [264] Carlson and Herdman 2016.
- [265] C. Fornell and D. F. Larcker, "Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error," *Journal of marketing research*, vol. 18, no. 1, pp. 39–50, 1981. <https://doi.org/10.2307/3151312>.
- [266] P. Gagne and G. R. Hancock, "Measurement model quality, sample size, and solution propriety in confirmatory factor models," *Multivariate Behavioral Research*, vol. 41, no. 1, pp. 65–83, 2006. https://doi.org/10.1207/s15327906mbr4101_5.

- [267] T. A. Brown and M. T. Moore, "Confirmatory factor analysis," *Handbook of structural equation modeling*, pp. 361–379, 2012.
- [268] N. Khenak, J.-M. Vézien, and P. Bourdot, "The construction and validation of the sp-ie questionnaire : An instrument for measuring spatial presence in immersive environments," in *International Conference on Virtual Reality and Augmented Reality*, pp. 201–225, Springer, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31908-3_13.
- [269] G. A. Miller, "The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information.," *Psychological review*, vol. 63, no. 2, p. 81, 1956.
- [270] P. W. Fink, P. S. Foo, and W. H. Warren, "Obstacle avoidance during walking in real and virtual environments," *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, vol. 4, no. 1, pp. 2–es, 2007. <https://doi.org/10.1145/1227134.1227136>.
- [271] E. D. Ragan, A. Sowndararajan, R. Kopper, and D. A. Bowman, "The effects of higher levels of immersion on procedure memorization performance and implications for educational virtual environments," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 19, no. 6, pp. 527–543, 2010.
- [272] L. Liu, R. Ip, A. Shum, and C. Wagner, "Learning effects of virtual game worlds : An empirical investigation of immersion, enjoyment and performance," 2014.
- [273] N. Khenak, J. Vézien, and P. Bourdot, "Spatial presence, performance, and behavior between real, remote, and virtual immersive environments," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2020.
- [274] P. Dourish, *Where the action is : the foundations of embodied interaction*. MIT press, 2004.
- [275] J. Blascovich, "Social influence within immersive virtual environments," in *The social life of avatars*, pp. 127–145, Springer, 2002.
- [276] S. Weech, S. Kenny, and M. Barnett-Cowan, "Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related : a review," *Frontiers in psychology*, vol. 10, p. 158, 2019.
- [277] M. Csikszentmihalyi and M. Csikszentmihaly, *Flow : The psychology of optimal experience*, vol. 1990. Harper & Row New York, 1990.
- [278] M. Grimshaw, J. Charlton, and R. Jagger, "First-person shooters : Immersion and attention," *Eludamos. Journal for Computer Game Culture*, vol. 5, no. 1, pp. 29–44, 2011.
- [279] M. Mori, K. F. MacDorman, and N. Kageki, "The uncanny valley [from the field]," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 98–100, 2012.

ANNEXE A

UNITY 3D

Pour mener à bien les expérimentations décrites dans les chapitres 3 et 5, nous avons dû développer plusieurs environnements immersifs et interactifs. Pour ce faire, nous avons en grande partie utilisé le logiciel Unity 3D, identifié au préalable par l'équipe comme étant le plus à même de réaliser les tâches visées.

Cet annexe décrit ainsi Unity 3D à travers une brève présentation du logiciel et un descriptif de ses points forts.

A.1 Présentation du logiciel

Unity 3D est un moteur de jeu multiplateforme développé par Unity Technologies¹. Il centralise la gestion des images, des sons, de la physique et permet surtout la réalisation de jeux compatibles avec la plupart des appareils, notamment :

- Microsoft Windows, MacOS, Linux.
- iOS, Android.
- Playstation, Xbox, Wii.
- Navigateur internet (avec ou sans plugin).

C'est aussi un logiciel de modélisation intégrant une interface très intuitive. Plus précisément, Unity 3D se présente sous la forme d'un IDE (i.e. une interface graphique, voir figure A.1) et d'un éditeur de script compatible avec les langages de programmation C#, Unity Script (un dérivé du Javascript) et Boo. Son IDE donne une approche orientée asset qui simplifie le prototypage et la création, ce qui lui permet d'être très apprécié des développeurs aussi bien amateurs que professionnels.

La première version du logiciel est sortie en 2005. Aujourd'hui, nous en sommes à la version 2020.1 beta. Ce logiciel est disponible en 2 versions : l'une gratuite² (pour sa version personnelle) et l'autre payante.

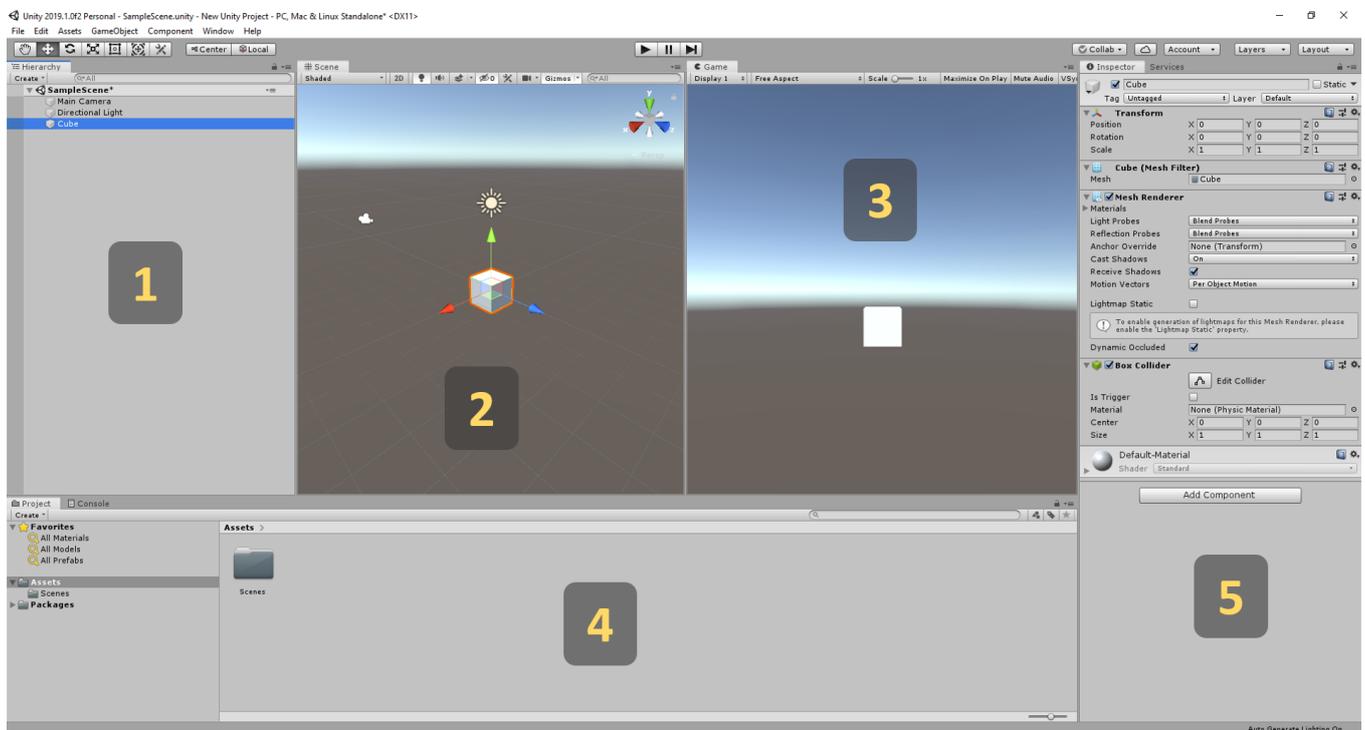


FIGURE A.1 – Interface graphique du logiciel Unity3D.

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

2. Bien que gratuite, cette version de Unity 3D dispose d'assez d'éléments pour créer un jeu de A à Z.

A.1.1 L'interface graphique

La figure A.1 représente l'agencement par défaut des cinq panneaux principaux de Unity 3D. A noter que chaque panneau est *déplaçable* : il suffit de « glisser déposer » leurs onglets pour les agencer autrement.

- 1 : **La hiérarchie.** Ce panneau contient l'arborescence des « GameObjects » présents sur la « scène ». Les GameObjects sont les objets élémentaires ou « entités » du moteur de jeu Unity. Ils peuvent être hiérarchisés entre eux, ce qui fait qu'un GameObject pourra détenir plusieurs GameObjects enfants. Ceux-ci hériteront de certaines propriétés de leur parents (notamment la position dans la scène). Ils peuvent également interagir ensemble ou individuellement, en agissant sur la scène en fonction des « composants » qu'ils contiennent. Les composants permettent de définir les fonctionnalités des gameObjects. Il existe différents composants par exemple des composants pour ajouter des effets de simulation physique, des scripts ou des composants pour afficher des images.
- 2 : **La scène.** Elle contient tous les GameObjects, i.e. tout ce qui est affiché dans la hiérarchie et permet de les manipuler de manière intuitive via de simples « drag and drop ».
- 3 : **Le game.** C'est le rendu de la scène de l'application. En d'autres termes, ce panneau représente en temps réel ce qui sera affiché à l'écran lors du lancement de l'application en cours de développement.
- 4 : **Le projet et la console.** Ce panneau horizontal contient la structure des fichiers du projet Unity, ainsi que la console (que l'on voit pour le moment seulement en onglet) qui permet d'afficher le bon - ou le mauvais - déroulement des scripts).
- 5 : **L'inspecteur.** Pour finir, le panneau latéral droit permet l'affichage des informations du GameObject actuellement sélectionné ainsi que la gestion de ses composants.

A.2 Intérêts et forces du logiciel

Comme mentionné dans la section précédente, Unity 3D dispose d'une interface graphique simplifiant la manipulation des éléments notamment pour les non-initiés à la programmation. Or, bien d'autres aspects en font l'un des logiciels les plus répandus dans l'industrie du jeu vidéo, aussi bien pour les grands studios que pour les indépendants.

A.2.1 Un asset store riche et accessible

Il existe un « store » (i.e. magasin) Unity dans lequel il est possible d'acheter des plugins et des gameObjects de tous types (voir figure A.2). Ce store est alimenté par des développeurs indépendants qui vendent leur outils de développement.

Les plugins achetés peuvent être installés de manière totalement transparente, les options s'ajoutant tout sim-

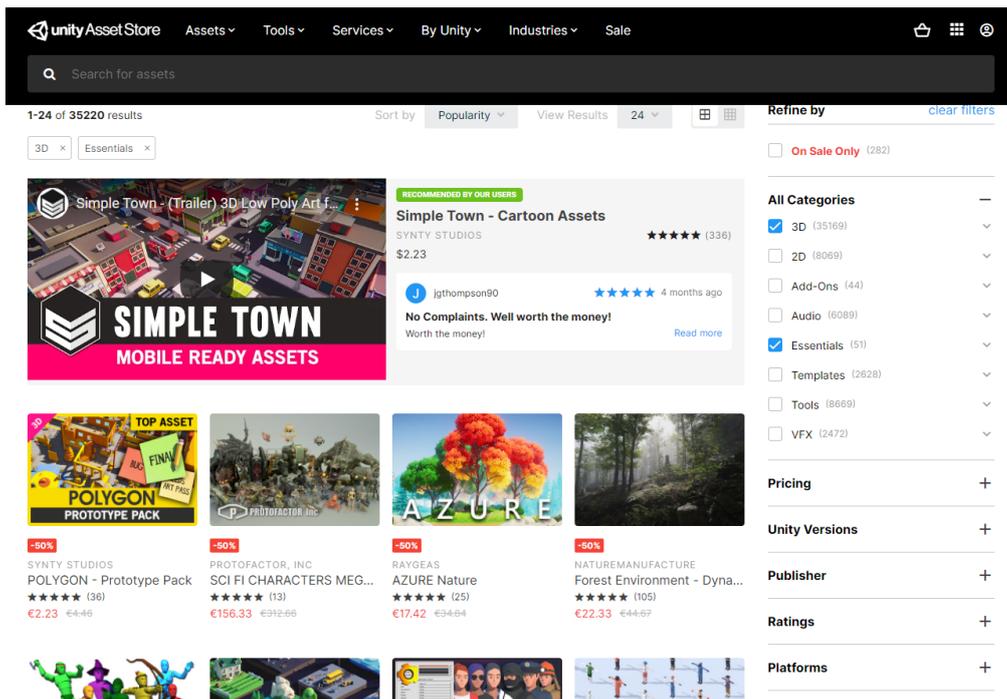


FIGURE A.2 – Unity Asset Store.

plement dans la barre des menus. Les GameObjects, quant à eux, peuvent être remaniés via le code, assurant ainsi une grande liberté de personnalisation des éléments.

A.2.2 Un développement multi-plateforme

Un des plus gros avantages de Unity est la possibilité de « builder » l'application en cours de développement pour n'importe quelle plateforme, sans avoir à modifier le code source. Par ailleurs, Unity permet d'importer les assets graphiques de quasiment tous les logiciels 3D (ex. 3ds, Max et Maya).

A.2.3 Une communauté qui s'entraide

Depuis sa création, Unity met à disposition des débutants, des projets de jeux pré-faits ainsi que des tutoriels gratuits permettant une prise en main rapide et des approfondissements ciblés suivant les tâches à effectuer.

De plus, Unity étant très connu, il existe une forte communauté s'entraidant. Ainsi, de nombreux forums comme par exemple, Unity 3D France, permettent aux développeurs expérimentés d'en apprendre plus et aux novices de visualiser une large palette de créations de la communauté Unity.

ANNEXE B

PROCESSUS TECHNIQUE DE FABRICATION DU MASQUE

Cet annexe détaille les étapes que nous avons suivies afin de fabriquer un masque en carton nécessaire lors de notre première expérimentation (décrite en chapitre 3). Ce masque avait pour but de limiter le champ de vision des participants à 110°, similairement à celui du casque de réalité virtuel **HTC-Vive**¹.

1. <https://www.vive.com/fr/product/vive/>

B.1 Configuration du masque

Le champ de vision du masque a été configuré en suivant une procédure de calibration résumée dans la figure B.1. La tête immobile et un oeil fermé, la procédure consistait à regarder une cible composée de lignes verticales tracées sur une planche verticale. Cette dernière était positionnée à une distance fixe, fournissant ainsi un support concret pour mesurer le champ de vision.

En regardant directement la « ligne zéro », différentes tailles d'ouvertures des yeux ont été testées jusqu'à ce que le champ de vision perçu corresponde à la ligne de 55° de chaque côté. La procédure a été répétée pour chaque oeil afin de créer la maquette finale du masque.

Cette méthode donne une mesure du champ de vision qui est certes subjective, mais correspond pratiquement en tout point à celle obtenue lors d'une procédure de calibration identique avec le HTC-Vive.

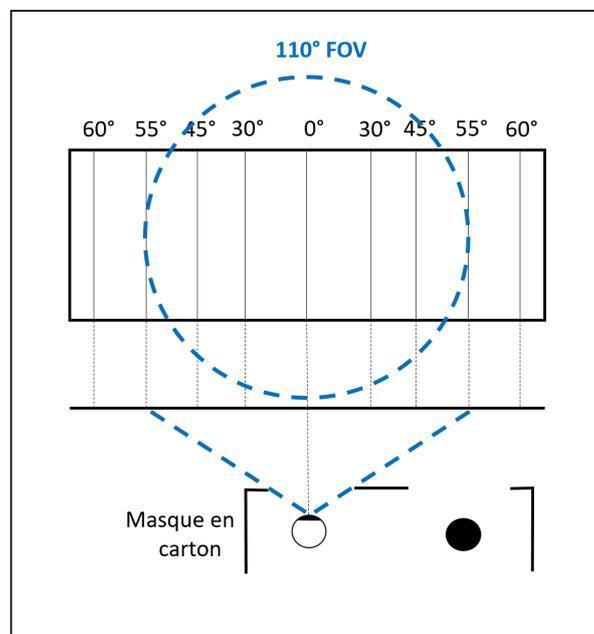


FIGURE B.1 – Diagramme résumant la procédure de calibration du masque.

B.2 Fabrication du masque

La fabrication du masque est passée par les étapes suivantes :

1. La maquette du masque a été conçue sur le logiciel de conception graphique CorelDraw², puis découpée à l'aide d'une découpeuse laser au **Fablab Digiscope de l'université de Paris-Saclay**³. Comme nous voulions que la structure soit rigide tout en restant légère, nous avons utilisé un carton de type « ondulé »

2. <https://www.coreldraw.com/fr/>

3. <http://www.digiscope.fr/fr/platforms/fablab>

pour la partie extérieure du masque. Concernant la partie intérieure, nous avons utilisé carton plus fin mais résistant afin de faciliter l'assemblage des deux pièces constituant le masque (figure B.2).

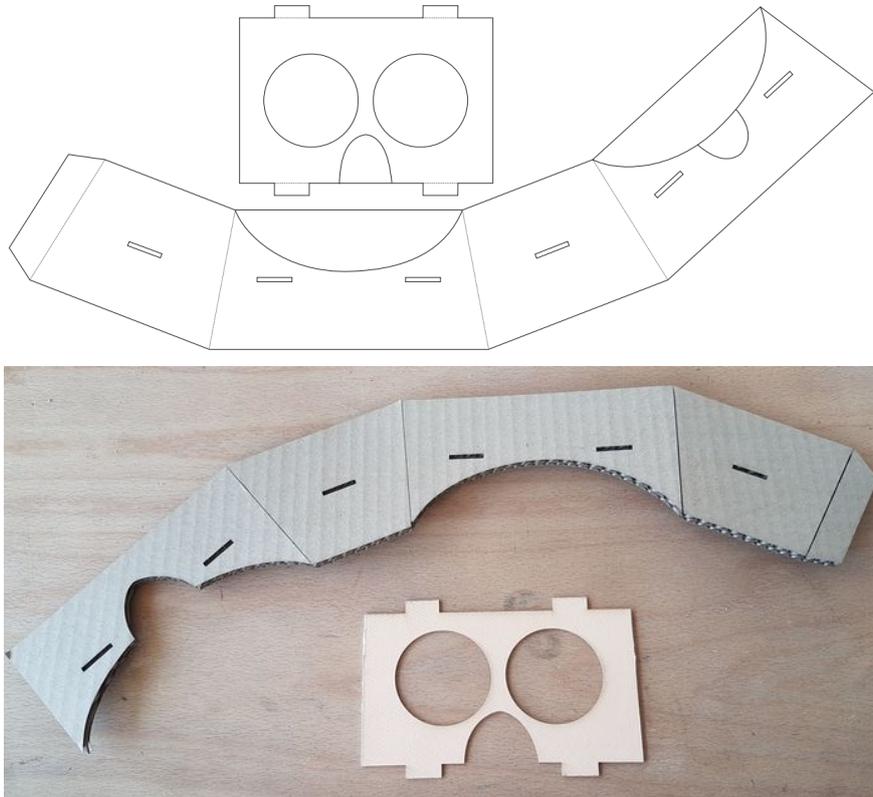


FIGURE B.2 – Image de gauche : maquette du masque. Image de droite : pièces découpées du masque.

2. Une fois assemblé, le masque a été peint en noir dans le but de se rapprocher de la couleur du HTC-Vive.
3. Finalement, des morceaux de mousse ont été ajoutés sur les bords du masque afin d'éviter toute gêne aux participants lors de son utilisation (figure B.3).

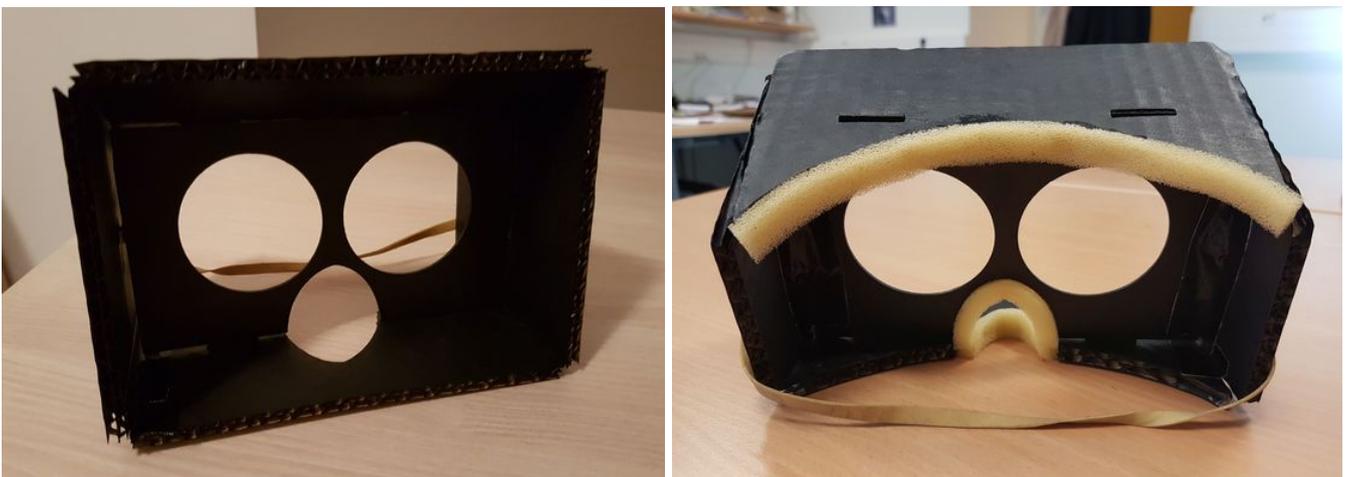


FIGURE B.3 – Image de gauche : maquette du masque. Image de droite : pièces découpées du masque.

ANNEXE C

QUESTIONNAIRE SP-IE

Cet annexe présente le questionnaire dont nous avons décrit l'élaboration en chapitre 4.

Contact

Pour toute question concernant le document ci-présent, vous pouvez contacter Nawel Khenak

Equipe VENISE, LIMSI/CNRS, Université Paris-Sud, Paris-Saclay

Campus Universitaire bâtiment 507, Rue John Von Neumann, 91400 Orsay, France.

nawel.khenak@limsi.fr



Questionnaire SP-IE

[Spatial Presence for Immersive Environments]

Instructions d'utilisation

Le questionnaire doit être administré à des participants directement après leur exposition à un environnement immersif (virtuel ou distant) dans le cadre d'une expérience utilisateur portant principalement sur le sentiment de présence spatiale.

Les participants doivent répondre de manière spontanée et ne pas passer trop de temps sur chaque question. A titre indicatif, le remplissage du questionnaire devrait prendre moins de 10 minutes.

Le questionnaire se divise en 7 échelles comme suit :

- 1- **Le sentiment de présence spatiale** : décrit par 4 questions (n° 3, n° 5, n° 7, n° 9).
- 2- **L'affordance de l'environnement** : décrit par 4 questions (n° 11, n° 12, n° 14, n° 16).
- 3- **L'amusement du participant**: décrit par 3 questions (n° 1, n° 2, n° 6).
- 4- **Le degré de réalité attribué à l'environnement** : décrit par 3 questions (n° 10, n° 15, n° 17).
- 5- **L'attention accordée à l'activité** : décrit par 2 questions (n° 8, n° 13).
- 6- **Le mal des systèmes ou cybersickness** : décrit par 2 questions (n° 4, n° 18).
- 7- **La présence sociale (des avatars)** : décrit par 2 questions (n° 19, n° 20). [Optionnel]

Pour plus d'informations sur le questionnaire, voir :

Khenak N., Vezien J., Bourdot P. (2019). The Construction and Validation of the SP-IE questionnaire: An instrument for measuring Spatial Presence in Immersive Environments. In Proceedings of the 16th EuroVR International Conference, Tallinn, Estonia

Questionnaire SP-IE

Note explicative

Nous aimerions avoir votre avis concernant l'expérience que vous venez de vivre dans l'environnement

Pour ce faire, nous vous invitons à remplir le questionnaire ci-dessous. Il est composé de 20 questions et ne devrait pas vous prendre plus de 10 minutes. Pour chaque question, veuillez à choisir une seule réponse.

Le questionnaire est **RECTO/VERSO**.

Identifiant participant :

Veillez indiquer COMBIEN VOUS ETES EN ACCORD OU EN DESACCORD avec chacun des énoncés suivants en encerclant seulement UN des chiffres à l'aide de l'échelle de 5 points ci-dessous.

Fortement en désaccord	1
En désaccord	2
Ni en accord ni en désaccord	3
En accord	4
Fortement en accord	5

-
1. J'aurais aimé que l'expérience se poursuive.
En désaccord 1 2 3 4 5 En accord
 2. Le contenu de l'environnement m'a captivé(e).
En désaccord 1 2 3 4 5 En accord
 3. Mes expériences sensorielles (vision, audition, etc.) dans l'environnement ressemblaient à mes expériences dans la vie quotidienne.
En désaccord 1 2 3 4 5 En accord
 4. Je me suis senti(e) désorienté(e) durant l'expérience.
En désaccord 1 2 3 4 5 En accord
 5. C'était comme si je m'étais réellement déplacé(e) dans l'environnement.
En désaccord 1 2 3 4 5 En accord
 6. Je me suis amusé(e) durant l'expérience.
En désaccord 1 2 3 4 5 En accord
 7. J'avais l'impression d'être physiquement présent(e) dans l'environnement.
En désaccord 1 2 3 4 5 En accord
 8. J'ai accordé plus d'attention à l'environnement qu'à mes pensées (préoccupations personnelles, rêveries, etc.).
En désaccord 1 2 3 4 5 En accord
 9. Je me sentais entouré(e) par l'environnement.
En désaccord 1 2 3 4 5 En accord
 10. Je sentais que je pouvais agir dans l'environnement.
En désaccord 1 2 3 4 5 En accord

Veillez indiquer COMBIEN VOUS ETES EN ACCORD OU EN DESACCORD avec chacun des énoncés suivants en encerclant seulement UN des chiffres à l'aide de l'échelle de 5 points ci-dessous.

Fortement en désaccord	1
En désaccord	2
Ni en accord ni en désaccord	3
En accord	4
Fortement en accord	5

11. Je pouvais facilement examiner le contenu de l'environnement.

En désaccord 1 2 3 4 5 En accord

12. Je sentais que l'environnement réagissait correctement aux actions que j'accomplissais.

En désaccord 1 2 3 4 5 En accord

13. La seule chose à laquelle je pensais était mon activité au sein de l'environnement.

En désaccord 1 2 3 4 5 En accord

14. Je me sentais compétent(e) en terme d'interaction et de déplacement dans l'environnement.

En désaccord 1 2 3 4 5 En accord

15. Je sentais que l'environnement n'était pas juste quelque chose que j'observais.

En désaccord 1 2 3 4 5 En accord

16. J'étais capable d'anticiper les conséquences de mes mouvements.

En désaccord 1 2 3 4 5 En accord

17. Je sentais que mes actions dans l'environnement avaient des conséquences réelles.

En désaccord 1 2 3 4 5 En accord

18. Je me sentais nauséeux(se) durant l'expérience.

En désaccord 1 2 3 4 5 En accord

Répondez à ces questions si seulement si :

- **D'autres personnages (réels ou virtuels) se trouvaient dans l'environnement :**

19. J'avais l'impression que les autres personnages avaient conscience de ma présence.

En désaccord 1 2 3 4 5 En accord

20. J'avais l'impression de partager le même espace que les autres personnages.

En désaccord 1 2 3 4 5 En accord

ANNEXE D

ANALYSE DU SP-IE : DONNÉES COMPLÉMENTAIRES

Cet annexe illustre une partie des résultats de l'analyse statistique sur le questionnaire SP-IE développé en chapitre 4.

TABLE D.1 – Statistiques descriptives pour chaque échelle et item à partir des données recueillies lors des deux expériences « *Réel vs. Distant* » et « *Drone Arena* ».

Échelle	Moyenne + SD	Item	Moyenne + SD
Présence spatiale	3.46 +/- 1.03	SP1	3.3 +/- 1.14
		SP2	3.6 +/- 0.94
		SP3	3.4 +/- 1.19
		SP4	3.6 +/- 0.94
		SP5	3.4 +/- 0.95
Fidélité	3.1 +/- 1.09	FID1	3.9 +/- 0.89
		FID2	3.4 +/- 1.04
		FID3	3.2 +/- 1.25
		FID4	3.6 +/- 0.98
		FID5	3.1 +/- 1.2
		FID6	3.5 +/- 1.13
		FID7	3.7 +/- 1.11
		FID8	3.3 +/- 1.12
		FID9	3.4 +/- 1.07
		FID10	3.5 +/- 1.18
		FID11	3.0 +/- 1.0
		FID12	2.7 +/- 1.13
Affordance	3.27 +/- 1.0	AFF1	3.6 +/- 0.9
		AFF2	2.5 +/- 1.13
		AFF3	3.7 +/- 0.82
		AFF4	3.7 +/- 1.06
		AFF5	3.1 +/- 1.1
		AFF6	3.4 +/- 0.98
		AFF7	2.9 +/- 1.03
Implication	3.71 +/- 0.85	IMP1	4,1 +/- 0.67
		IMP2	4,4 +/- 0.76
		IMP3	4.1 +/- 0.78
		IMP4	4.4 +/- 0.76
		IMP5	4.0 +/- 0.76
		IMP6	2.2 +/- 0.99

		IMP7	2.8 +/- 1.22
Attention	4.02 +/- 0.94	ATT1	4,2 +/- 0.76
		ATT2	4.0 +/- 0.98
		ATT3	3.9 +/- 1.0
		ATT4	4.4 +/- 0.84
		ATT5	4.0 +/- 0.85
		ATT6	3.7 +/- 1.15
		ATT7	4.4 +/- 0.82
		ATT8	3.4 +/- 1.23
		ATT9	4.2 +/- 0.84
Présence sociale	3.23 +/- 0.99	SOC1	3.3 +/- 0.95
		SOC2	2.6 +/- 1.13
		SOC3	3.6 +/- 0.92
		SOC4	3.4 +/- 0.98
Effets négatifs	3.68 +/- 1.2	NEG1	3,6 + 1.18
		NEG2	3.4 + 1.35
		NEG3	3.7 + 1.28
		NEG4	4.0 + 1.14
		NEG5	4.0 + 1.04
		NEG6	3.4 + 1.21

TABLE D.2 – Les valeurs des alphas de Cronbach et les corrélations de Pearson pour chaque dimension et item à partir des données recueillies lors des deux premières expériences « Réel vs. Distant » et « Drone Arena ». Les valeurs non acceptables sont colorées en rouge.

Échelle	Alpha de Cronbach	Item	Alpha de Cronbach	Correlation de Pearson
Présence spatiale	0.72	SP1	0.7	0.39
		SP2	0.7	0.46
		SP3	0.71	0.24
		SP4	0.61	0.53
		SP5	0.64	0.61
Fidélité	0.63	FID1	0.57	0.39
		FID2	0.57	0.57
		FID3	0.64	0.3

		FID4	0.58	0.37
		FID5	0.62	0.27
		FID6	0.56	0.36
		FID7	0.59	0.25
		FID8	0.56	0.35
		FID9	0.62	0.41
		FID10	0.67	0.34
		FID11	0.63	0.26
		FID12	0.65	0.28
Affordance	0.75	AFF1	0.7	0.6
		AFF2	0.74	0.44
		AFF3	0.77	0.36
		AFF4	0.69	0.45
		AFF5	0.71	0.54
		AFF6	0.71	0.59
		AFF7	0.69	0.56
Implication	0.48	IMP1	0.41	0.31
		IMP2	0.45	0.25
		IMP3	0.39	0.49
		IMP4	0.4	0.46
		IMP5	0.45	0.38
		IMP6	0.51	0.08
		IMP7	0.51	0.03
Attention	0.7	ATT1	0.66	0.5
		ATT2	0.63	0.54
		ATT3	0.68	0.3
		ATT4	0.66	0.21
		ATT5	0.66	0.32
		ATT6	0.76	0.15
		ATT7	0.69	0.2
		ATT8	0.66	0.34
		ATT9	0.63	0.48
Présence sociale	0.47	SOC1	0.47	0.24

		SOC2	0.41	0.4
		SOC3	0.30	0.52
		SOC4	0.42	0.6
Effets négatifs	0.8	NEG1	0.87	0.18
		NEG2	0.75	0.24
		NEG3	0.76	0.35
		NEG4	0.73	0.53
		NEG5	0.74	0.39
		NEG6	0.77	0.43
		TOTAL	0.88	

TABLE D.3 – Statistiques descriptives pour chaque échelle et chaque item à partir des données recueillies lors de l'expérience « *Illucity* ».

Échelle	Moyenne + SD	Item	Moyenne + SD
Présence spatiale	4.04 +/- 0.61	SP1	4.5 +/- 0.74
		SP2	3.96 +/- 1.01
		SP3	4.01 +/- 0.87
		SP4	3.73 +/- 1.0
Fidélité	3.94 +/- 0.54	FID1	3.85 +/- 1.07
		FID2	3.68 +/- 1.0
		FID3	4.37 +/- 0.71
		FID4	3.81 +/- 1.03
		FID5	4.07 +/- 0.76
		FID6	3.87 +/- 0.87
Affordance	3.68 +/- 0.67	AFF1	4.4 +/- 0.73
		AFF2	3.12 +/- 1.05
		AFF3	3.69 +/- 1.08
		AFF4	3.46 +/- 1.13
Implication	4.05 +/- 0.5	IMP1	3.1 +/- 1.33
		IMP2	4.08 +/- 0.9
		IMP3	4.5 +/- 0.78
		IMP4	4.46 +/- 0.73

		IMP5	4.33 +/- 0.92
Attention	4.38 +/- 0.46	ATT1	4.56 +/- 0.69
		ATT2	4.8 +/- 0.42
		ATT3	4.01 +/- 0.81
		ATT4	4.13 +/- 0.88
Présence sociale	3.76 +/- 0.88	SOC1	3.75 +/- 1.08
		SOC2	3.11 +/- 1.32
		SOC3	4 +/- 1.17
		SOC4	4.19 +/- 1.1
Effets négatifs	3.81 +/- 0.84	NEG1	3.61 +/- 1.28
		NEG2	3.6 +/- 1.15
		NEG6	4.23 +/- 1.16

Titre : Vers un modèle unifié de la Présence Spatiale et de ses facteurs : application à l'étude de la Téléprésence en environnements immersifs

Mots clés : Présence spatiale, Téléprésence, Immersion, Réalité subjective, Affordance, Expérimentation utilisateur

Résumé : La « présence spatiale » est un phénomène psycho-cognitif faisant référence à la sensation éprouvée par une personne lorsqu'elle a l'impression de se trouver physiquement dans un espace donné. A l'instar d'autres phénomènes psycho-cognitifs, aucun consensus n'a encore été atteint sur la définition ou le moyen de mesurer cette sensation. Par conséquent, cette thèse s'attèle à établir un modèle de la présence spatiale à travers la mise en lumière de ses facteurs et des outils pour mesurer son intensité.

Ainsi, tout en tenant compte des nouvelles avancées technologiques dans le domaine de la Réalité Virtuelle (RV), le premier apport de cette thèse a été de **décrire de manière précise les facteurs jouant un rôle dans l'émergence de la présence spatiale** au travers d'un modèle conceptuel unifiant les théories existantes.

Afin de pouvoir évaluer ce phénomène, il était impératif de trouver des moyens permettant de le quantifier de manière stable. Cette tâche s'avère compliquée au regard de la nature subjective de la présence : les outils les plus utilisés sont les questionnaires administrés à des utilisateurs, à l'issue d'une expérience en environnement contrôlé. Cependant d'autres outils plus objectifs existent, notamment l'analyse comportementale des utilisateurs lorsqu'ils interagissent avec l'environnement. Néanmoins, la fiabilité de ces mesures reste encore sujette à débat.

Un second apport de cette thèse a donc été de **mettre en place des outils de mesure de la présence spatiale fiables et valides**, non seulement en combinant les approches subjectives et objectives déjà existantes, mais en proposant également de nouvelles mesures. Dans cette optique, **un questionnaire de présence spatiale a été élaboré**. De plus, différentes mesures comportementales ont été testées au travers d'**expériences où des utilisateurs devaient accomplir certaines tâches dans différents environnements immersifs**.

Aussi, une attention particulière a été portée aux **environnements distants qui permettent d'engendrer la sensation de « Téléprésence »**, cette dernière ayant été beaucoup moins étudiée que la présence en environnements virtuels. L'intérêt des environnements distants est que **les actions entreprises en leur sein ont des conséquences réelles dans notre monde**, ce qui n'est pas le cas des environnements générés par ordinateur dans lesquels les actions restent confinées. De ce fait, les utilisateurs ont **conscience de l'impact de leurs actions** dans le monde réel, ce qui peut influencer leur comportement et affecter la présence ressentie. Par conséquent, la téléprésence peut mettre en évidence des facteurs différents de ceux engendrés en environnements virtuels.

De plus, la téléprésence peut être comparée à la présence « naturelle » ressentie par les utilisateurs localisés physiquement dans des environnements réels. Ce type de comparaison permet de mettre en évidence l'effet de l'utilisation des technologies sur la présence.

En effet, les résultats des expériences menées, **comparant la présence spatiale dans des environnements réels, distants et virtuels**, ont montré une différence significative entre les environnements concernant le degré de présence spatiale ressenti ainsi que certains de ses facteurs, en particulier le « *degré de réalité* » accordé à l'environnement.

En conclusion, les travaux menés durant cette thèse ont permis d'établir un modèle de la présence spatiale, d'analyser son lien avec différents facteurs et de mettre en place des outils pour mesurer ces derniers. Le modèle peut maintenant être exploité pour caractériser la présence spatiale dans le but d'améliorer les systèmes de RV, que ce soit en terme de performance ou de bien-être utilisateur. En particulier, la situation de pandémie de Covid-19 survenue pendant la durée de ce travail est un exemple frappant qui encourage l'étude et l'utilisation des systèmes de téléprésence.

Title : Towards a unified model of Spatial Presence and its factors : application to the study of Telepresence in immersive environments

Keywords : Spatial presence, Telepresence, Immersion, Subjective reality, Affordance, User experimentation

Abstract : « Spatial presence » is a psycho-cognitive phenomenon that refers to the sensation experienced by people when they feel they are physically located in a given space. This feeling has already been studied extensively. However, like other psycho-cognitive phenomena, no consensus has yet been reached on its definition or how to measure it. Therefore, this thesis attempts to establish a model of spatial presence by highlighting the factors involved in its emergence, and the tools to measure its intensity.

Thus, while taking into account the new technological advances in the field of Virtual Reality (VR), the first contribution of this thesis was to **describe the main factors of spatial presence gathered into a conceptual model** that takes into account the existing theories. Many factors of different importance exist, the best known is the « *immersion* » factor. Particular attention was paid to this factor through the evaluation of spatial presence in **highly immersive environments**.

Yet, the evaluation of spatial presence can only be done by finding stable ways to quantify it. This task proves to be complicated due to the subjective nature of the phenomenon : the most commonly used tools are questionnaires administered to users after they have completed an experiment in a controlled environment. However, other more objective tools exist, such as the behavioral analysis of users when interacting within an environment. Nevertheless, the reliability of these measurements is still open to debate.

Then, the second contribution of this thesis was to **find reliable and valid tools for measuring spatial presence**, not only by combining the subjective and objective approaches already existing but also by proposing new measures to evaluate this phenomenon and its factors. To this end, **a spatial presence questionnaire was developed**. In addition, different measures based on human behavior were

assessed through **the conduction of experiments where users had to perform specific tasks in different immersive environments**.

Particular attention has also been paid to **remote environments that can generate the feeling of « Telepresence »**, which has been much less studied than presence in virtual environments. The advantage of remote environments is that **the actions in such environments have real consequences in our world**, in contrast to computer-generated environments in which actions remain confined. The **users' awareness of the impact of their actions** in remote environments influences their behavior, and could, therefore, affect the presence experienced. Consequently, spatial telepresence may highlight different factors compared to those generated in virtual environments. Besides, telepresence can be compared to « *natural* » presence experienced by users when they are physically located in real environments without any technological mediation. Such comparison allows to highlight the effect of the technologies used on the feeling of presence.

Indeed, the results of the experiments conducted during this thesis, **comparing real, remote, and virtual environments**, showed a significant difference between the environments in the degree of spatial presence as well as in some of its factors, such as the « *degree of reality* » attributed to the environment.

In conclusion, the work carried out during this thesis allowed developing a model of spatial presence, analyzing its relationship with several factors, and finding suitable tools to measure them. The model can now be used to characterize spatial presence in order to improve VR systems, either in terms of performance or user well-being in concrete contexts. In particular, the Covid-19 pandemic situation that occurred during this thesis is a very good example that encourages the study and the use of spatial telepresence systems.

