



HAL
open science

Le sentiment de présence en réalité virtuelle : rôle modérateur des facteurs humains sur la performance

Arthur Maneuvrier

► To cite this version:

Arthur Maneuvrier. Le sentiment de présence en réalité virtuelle : rôle modérateur des facteurs humains sur la performance. Psychologie. Normandie Université; Université de Montréal, 2020. Français. NNT : 2020NORMC035 . tel-03198706

HAL Id: tel-03198706

<https://theses.hal.science/tel-03198706>

Submitted on 15 Apr 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.



Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité PSYCHOLOGIE

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

**En cotutelle internationale avec MONTREAL UNIVERSITE DE MONTREAL CANADA ,
CANADA**

**Le sentiment de présence en réalité virtuelle : rôle modérateur
des facteurs humains sur la performance**

**Présentée et soutenue par
Arthur MANEUVRIER HERVIEU**

**Thèse soutenue publiquement le 15/12/2020
devant le jury composé de**

Mme SYLVIE BELLEVILLE	Professeur des universités, l'Université de Montréal	Rapporteur du jury
M. FRANCO LEPORE	Professeur des universités, l'Université de Montréal	Rapporteur du jury
Mme EMILIE LOUP-ESCANDE	Maître de conférences, Université Amiens Picardie Jules Verne	Rapporteur du jury
Mme LESLIE DECKER	Maître de conférences HDR, Université Caen Normandie	Membre du jury
M. DANIEL MESTRE	Professeur des universités, Aix- Marseille Université	Membre du jury
M. PATRICE RENAUD	Professeur des universités, l'Université de Montreal	Membre du jury
M. PHILIPPE FLEURY	Professeur des universités, Université Caen Normandie	Directeur de thèse
M. JEAN-LOUIS VERCHER	Professeur des universités, Aix- Marseille Université	Président du jury

**Thèse dirigée par PHILIPPE FLEURY, Equipe de recherche sur les littératures, les
imaginaires et les sociétés (Caen)**



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE



ERLIS

Université de Montréal – Université de Caen Normandie

Le sentiment de présence en réalité virtuelle :
rôle modérateur des facteurs humains sur la performance

Par

Arthur Maneuvrier

Département de Psychologie
Faculté des Arts et des Sciences

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Psychologie

Option Neurosciences Cognitives

Septembre 2020

© Arthur Maneuvrier, 2020

Université de Montréal

Département de Psychologie - Faculté des Arts et des Sciences

Cette thèse intitulée

Le sentiment de présence en réalité virtuelle :
rôle modérateur des facteurs humains sur la performance

Présentée par

Arthur Maneuvrier

A été évaluée par un jury composé des personnes suivantes

Jean-Louis Vercher – Président

Franco Lepore – Co-président & Rapporteur

Patrice Renaud – Directeur de recherche

Philippe Fleury – Co-directeur

Leslie Decker – Co-encadrante

Sylvie Belleville – Rapporteuse

Emilie Loup-Escande – Examinatrice externe

Daniel Mestre – Membre du jury

Résumé

La réalité virtuelle s'est imposée comme un nouveau paradigme de la recherche et des applications scientifiques. La capacité de cette technologie à simuler des situations complexes sur mesure offre aux chercheurs la possibilité d'étudier des comportements possédant contrôle méthodologique et dimension écologique. Cette dernière est rendue possible par l'émergence du sentiment de présence, la sensation « d'être là », phénomène au cœur des études *in virtuo*. Le présent travail s'inscrit dans un cadre méthodologique et fondamental visant à faire avancer l'émergence d'un corps de connaissances sur la réalité virtuelle et son sentiment de présence. En effet, la compréhension globale de ce dernier demeure très limitée, notamment au regard de ses liens avec la performance en réalité virtuelle. Que ce soit dans un but de diagnostic ou d'investigation du comportement humain, la question de la relation entre sentiment de présence et performance est pourtant cruciale : si la présence favorise la performance, par exemple la performance à un test neuropsychologique, celle-ci devient un biais systématique inhérent à l'outil qu'il est nécessaire de contrôler pour toute expérimentation rigoureuse. Si cette question demeure peu étudiée dans la littérature c'est parce qu'elle est largement complexifiée par les interactions entre tout un ensemble de variables adjacentes – genre, cybermalaises, style cognitif, expérience des jeux vidéo –, mais aussi parce que la performance peut prendre des myriades de formes différentes et qu'il est ainsi particulièrement ardu d'inférer une causalité directionnelle. Afin d'explorer cette question, le présent travail propose trois expérimentations sur trois différents types d'évaluation : fonctions exécutives, cognition spatiale, apprentissage sémantique. Les données ainsi recueillies font également l'objet d'analyses transversales destinées à comparer les expérimentations. Ensemble, ces résultats semblent distinguer l'existence de deux composants de la réalité virtuelle. Le premier, le profil cognitif, est constitué par les facteurs humains individuels interagissant avec les facteurs systèmes – notamment le degré d'intégration de la tâche – pour moduler le deuxième, l'expérience utilisateur. De cette expérience utilisateur dépendent le sentiment de présence, la performance, mais aussi leur relation. Ce modèle, présenté en conclusion, est discuté au regard d'approches théoriques différentes de la cognition et permet de dresser une liste de recommandations et de perspectives pour les utilisateurs de la réalité virtuelle, notamment les possibilités d'estimer a priori l'expérience utilisateur d'un individu.

Mots-clés : immersion, évaluation neuropsychologique, environnements virtuels, interaction homme-machine, cybermalaises, jeux vidéo, dépendance au champ, style cognitif, genre, ressources attentionnelles.

Abstract

Virtual reality has emerged as a new paradigm for research and scientific applications. The ability of this technology to simulate complex custom-made situations offers researchers the opportunity to study behaviours with a laboratory methodological control and an ecological dimensions. The latter is made possible by the emergence of the feeling (or “sense”) of presence, the sensation of “being there”, a phenomenon at the heart of in virtuo studies. The present work is part of a methodological and fundamental framework aimed at advancing the emergence of a body of knowledge on virtual reality and its sense of presence. The global understanding of the sense of presence remains very limited, especially with regard to its links with performance in virtual reality. Whether it is for diagnostic purposes or for the investigation of human behaviour, the question of the relationship between the sense of presence and performance is crucial: if presence promotes performance, for example by increasing scores during a neuropsychological test, it becomes a systematic bias inherent to the tool that must be controlled in any rigorous experiment. This question remains little studied in the literature, mostly because it is complexified by the interactions between a whole set of adjacent variables – gender, cybersickness, cognitive style, video game experience – but also because performance can take many different forms, making it particularly difficult to infer directional causality. In order to explore this question, the present work proposes three experiments on three different types of evaluation: executive functions, spatial cognition, semantic learning. The data collected in this way is also the object of transversal analyses designed to compare the experiments. Together, these results seem to suggest the existence of two components of virtual reality. The first, the *cognitive profile*, is made up of individual human factors interacting with system factors – notably the degree of integration of the task into the virtual environment – to build the second, the *user experience*. The sense of presence and performance, but also their relationship depends on the user experience. This model, presented in conclusion, is discussed with regard to different theoretical approaches to cognition, notably the ecological and computational theories. This discussion makes it possible to draw up a list of recommendations and perspectives for virtual reality users, including the possibilities of estimating a priori the user experience of an individual immersed in virtual reality.

Key-words: immersion, neuropsychological evaluation, virtual environments, human-computer interaction, cybersickness, video games, field dependence, cognitive style, gender, attentional resources.

Table des matières

Résumé.....	5
Abstract.....	7
Table des matières.....	9
Liste des tableaux.....	21
Liste des figures.....	23
Remerciements.....	29
1. Introduction.....	31
2. Cadre théorique.....	34
2.1. La réalité virtuelle.....	34
2.1.1. Définitions.....	34
2.1.1.1. Réalité(s).....	34
2.1.1.2. La réalité virtuelle.....	35
2.1.1.3. Le continuum de virtualité.....	37
2.1.2. Historique.....	38
2.1.2.1. Histoire du concept.....	38
2.1.2.2. Histoire de la technique.....	40
2.1.3. Taxonomies.....	46
2.1.4. Applications.....	47
2.1.4.1. Archéologie et restitution patrimoniale.....	48
2.1.4.2. Arts & divertissements.....	50
2.1.4.3. Éducation & entraînement.....	51
2.1.4.4. Journalisme et sensibilisation.....	53
2.1.4.5. Marketing et industrie.....	53
2.1.4.6. Réseaux sociaux et télétravail.....	54
2.1.4.7. Sciences des données & visualisation.....	54

2.1.4.8. Sciences expérimentales	54
2.1.4.7.1. La dimension écologique	55
2.1.4.7.2. La cognition spatiale	56
2.1.4.7.3. Les mémoires	57
2.1.4.7.4. Le contrôle moteur	58
2.1.4.7.5. Les interactions sociales	58
2.1.4.7.6. L'éthologie	59
2.1.4.9. Sciences médicales et paramédicales	59
2.1.4.7.1. Rééducation	60
2.1.4.7.2. Traitement de la douleur	61
2.1.4.7.3. Santé mentale	62
2.1.5. Ethique	63
2.1.5.1. Effets physiologiques	63
2.1.5.2. Ethique en recherche	64
2.1.5.3. Ethique grand public	65
2.1.5.4. Ethique environnementale	66
2.2. Le sentiment de présence	68
2.2.1. Téléprésence et présence	68
2.2.1.1. Immersion et présence	68
2.2.1.2. La question de la présence	69
2.2.2. Ancrages théoriques	72
2.2.2.1. Théories de la perception et de la cognition	72
2.2.2.1.1. Théories rationalistes	72
2.2.2.1.2. Théories écologiques	74
2.2.2.2. Ontologies du sentiment de présence	76
2.2.2.2.1. Une présence rationaliste	76
2.2.2.2.2. Une présence écologique	76

2.2.2.2.3. Vers un modèle ontologique éclectique de la présence ?	77
2.2.3. De la présence à la conscience	78
2.2.3.1. Présence médiée et présence interne	78
2.2.3.2. Niveaux de présence et niveaux de conscience	79
2.2.3.3. Présence et sentiment d'incarnation	81
2.2.3.4. Présence et sentiment d'agentivité	82
2.2.3.5. Présence, attention et flow	83
2.2.3.6. Présence et rêves	87
2.2.3.7. Présence et mémoires	88
2.2.4. Propriétés et taxonomies	89
2.2.4.1. La présence dans le temps	90
2.2.4.1.1. Nature dynamique de la présence	90
2.2.4.1.2. Début et fin de présence	91
2.2.4.2. Taxonomies du sentiment de présence	93
2.2.4.2.1. La présence spatiale	93
2.2.4.2.2. La présence sociale et la coprésence	95
2.2.4.2.3. La présence de soi	97
2.2.4.2.4. La présence sexuelle	97
2.2.4.2.5. La présence d'objets	97
2.2.5. Evaluations du sentiment de présence	98
2.2.5.1. Les mesures subjectives	98
2.2.5.1.1. Les questionnaires	98
2.2.5.1.2. Les ruptures de présence	100
2.2.5.2. Les mesures comportementales	101
2.2.5.2.1. Analyse comportementale	101
2.2.5.2.2. Evaluations physiologiques	103
2.2.5.2.3. Neuro-imageries	104

2.2.6. Facteurs modérateurs du sentiment de présence	106
2.2.6.1. Les facteurs systèmes	107
2.2.6.1.1. Immersion.....	108
2.2.6.1.2. Interaction.....	109
2.2.6.1.3. Méta-analyse	110
2.2.6.2. Les facteurs humains	111
2.2.6.2.1. Les cybermalaises.....	112
2.2.6.2.2. Le style cognitif.....	114
2.2.6.2.3. La pratique des jeux vidéo	116
2.2.6.2.4. Le genre	118
2.2.6.2.5. Autres facteurs modérateurs.....	120
2.2.7. Présence et performance	122
2.2.7.1. La question de la performance	122
2.2.7.1.1. Définitions.....	122
2.2.7.1.2. Théories	122
2.2.7.1.3. La performance en réalité virtuelle.....	124
2.2.7.1.4. Performance et facteurs humains	125
2.2.7.1.5. Performance, présence et attention.....	127
2.3. Position du problème	130
2.3.1. Objectifs	130
2.3.2. Hypothèses	130
3. Matériels et méthodes	133
3.1. Neuroprésence : étude sur les fonctions exécutives	134
3.1.1. Problématisation.....	134
3.1.1.1. Objectifs.....	134
3.1.1.1.1. Stress de laboratoire	135
3.1.1.2. Hypothèses.....	135

3.1.2. Matériels & méthodes.....	136
3.1.2.1. Participants.....	136
3.1.2.2. Matériels.....	137
3.1.2.2.1. Test de la Baguette et du Cadre.....	137
3.1.2.2.2. Wisconsin Card Sorting Test.....	137
3.1.2.2.3. Questionnaires.....	139
3.1.2.3. Procédure.....	140
3.1.2.4. Analyses statistiques.....	140
3.2. Spatioprésence : étude sur la cognition spatiale.....	142
3.2.1. Problématisation.....	143
3.2.1.1. Objectifs.....	143
3.2.1.2. Hypothèses.....	143
3.2.2 Matériels & méthodes.....	144
3.2.2.1. Participants.....	144
3.2.2.2. Matériels.....	145
3.2.2.2.1. Test de la Baguette et du Cadre.....	145
3.2.2.2.2. Pratique des jeux vidéo.....	145
3.2.2.2.3. Test de cognition spatiale.....	146
3.2.2.2.4. Questionnaires.....	149
3.2.2.3. Procédure.....	149
3.2.2.4. Analyses statistiques.....	150
3.3. Nav(i)r : étude sur l'évolution de la dépendance au champ.....	151
3.3.1. Problématisation.....	151
3.3.1.1. Objectifs.....	151
3.3.1.1.1. Evolution de la dépendance au champ.....	152
3.3.1.1.2. La présence historique.....	152
3.3.1.1.3. Pratique des jeux vidéo.....	153

3.3.1.4. Hypothèses	153
3.3.2. Matériels & méthodes	154
3.3.2.1. Participants	154
3.3.2.2. Matériels	154
3.3.2.2.1. Test de la Baguette et du Cadre	154
3.3.2.2.2. Environnement virtuel	155
3.3.2.2.3. Questionnaires	156
3.3.2.2.4. Pratique des jeux vidéo	156
3.3.2.2.5. Présence historique	157
3.3.2.3. Procédure	157
3.3.2.4. Analyses statistiques.....	157
3.4. Eduprésence : étude sur l'apprentissage	159
3.4.1. Problématisation.....	159
3.4.1.1. Objectifs.....	159
3.4.1.1.1. Point de référence stéréoscopique	160
3.4.1.2. Hypothèses.....	161
3.4.2. Matériels & méthodes.....	162
3.4.2.1. Participants	162
3.4.2.2. Matériels	162
3.4.2.2.1. Visite pédagogique virtuelle	162
3.4.2.2.2. Test des Figures Enchevêtrées de Groupe.....	163
3.4.2.2.3. Questionnaires	164
3.4.2.2.4. Expérience des jeux vidéo	164
3.4.2.3. Procédure	165
3.4.2.4. Analyses statistiques.....	166
3.5. Analyses transversales	167
3.5.1. Problématisation.....	167

3.5.1.1. Objectifs.....	167
3.5.1.2. Hypothèses.....	167
3.5.2. Matériels & méthodes.....	168
3.5.2.1. Analyses statistiques.....	168
3.5.2.1.1. Analyses intragroupes.....	168
3.5.2.2.2. Analyses agrégées.....	168
4. Résultats.....	170
4.1. Neuroprésence : étude sur les fonctions exécutives.....	170
4.1.1. Modalités du Wisconsin Card Sorting Test selon le genre.....	170
4.1.2. Influence des facteurs humains sur la performance virtuelle.....	170
4.1.2.1. Corrélations entre genre et autres facteurs humains.....	170
4.1.2.2. Corrélations entre les différents facteurs humains.....	171
4.1.2.3. Analyse en composantes principales dans la modalité réalité virtuelle.....	171
4.1.2.4. Régressions linéaires.....	172
4.1.2.4.1. Performance au Wisconsin Card Sorting Test.....	172
4.1.2.4.2. Sentiment de présence.....	173
4.1.2.4.3. Cybermalaises.....	173
4.1.3. Effet du stress ressenti.....	173
4.1.3.1. Comparaison entre les deux modalités.....	173
4.1.3.2. Association du stress avec d'autres facteurs dans la modalité virtuelle.....	173
4.2. Spatioprésence : étude sur la cognition spatiale.....	174
4.2.1. Analyses préliminaires.....	174
4.2.1.1. Performance de cognition spatiale.....	174
4.2.1.2. Pratique des jeux vidéo.....	174
4.2.2. Matrice de corrélations.....	174
4.2.3. Analyse en composantes principales.....	176
4.2.4. Régressions linéaires.....	176

4.2.4.1. Performance de cognition spatiale	176
4.2.4.2. Sentiment de présence	177
4.2.4.3. Cybermalaises	177
4.2.4.4. Analyses de médiation	177
4.3. Nav(i)r : étude sur l'évolution de la dépendance au champ	178
4.3.1. Le sentiment de présence	178
4.3.1.1. Présence historique et présence spatiale.....	178
4.3.1.2. Dimensions de présence.....	178
4.3.1.2.1. Dépendance et évolution de la dépendance au champ	178
4.3.1.2.2. Cybermalaises.....	178
4.3.1.2.3. Expérience des jeux vidéo.....	178
4.3.2. Mesures de la pratique des jeux vidéo.....	179
4.3.2.1. Fréquence de pratique des jeux vidéo	179
4.3.2.2. Types de jeux vidéo pratiqués.....	179
4.3.2.3. Pratique des jeux vidéo.....	179
4.3.2.4. Comparaisons entre les variables de l'étude et les mesures relatives à la pratique des jeux vidéo.....	179
4.3.1 Evolution de la dépendance au champ.....	180
4.3.1.1 Evolution globale de la dépendance au champ	180
4.3.1.2. Composition des groupes	180
4.3.1.3. Comparaisons intra-groupes	181
4.3.1.4. Comparaison inter-groupes.....	181
4.3.1.4.1. Dépendance au champ pré-immersion (A)	181
4.3.1.4.2. Dépendance au champ post-immersion (B).....	181
4.3.1.4.3. Cybermalaises.....	182
4.3.1.4.4. Sentiment de présence spatiale.....	182
4.3.1.4.5. Sentiment de présence spatiale et historique	182

4.3.1.4.6. Autres comparaisons	182
4.4. Eduprésence : étude sur l'apprentissage	184
4.4.1. Analyses préliminaires.....	184
4.4.1.1. Présence historique	184
4.4.1.2. Mesures de l'expérience des jeux vidéo.....	184
4.4.1.2.1. Fréquence de la pratique des jeux vidéo	184
4.4.1.2.2. Expérience vidéoludique.....	184
4.4.1.2.3. Corrélations entre les variables de l'étude et les mesures relatives à l'expérience des jeux vidéo	184
4.4.2. Matrice de corrélations	185
4.4.3. Analyse en composantes principales.....	185
4.4.4. Régressions linéaires	186
4.4.4.1. Transfert de connaissance	186
4.4.4.2. Sentiment de présence	186
4.4.4.3. Cybermalaises	187
4.4.4.4. Analyses de médiation	187
4.5. Analyses transversales	188
4.5.1. Analyses intragroupes	188
4.5.1.1. Sentiment de présence	188
4.5.1.1.1. Neuroprésence	188
4.5.1.1.2. Spatioprésence	188
4.5.1.1.3. Eduprésence	188
4.5.1.2. Cybermalaises	189
4.5.1.2.1. Neuroprésence	189
4.5.1.2.2. Spatioprésence	189
4.5.1.2.3. Eduprésence	189
4.5.2. Analyses intergroupes	189

4.5.2.1. Sentiment de présence	189
4.5.2.2. Cybermalaises	190
4.5.3. Analyses agrégées	190
4.5.3.1. Matrice de corrélation.....	190
4.5.3.2. Analyse en composantes principales	191
4.5.3.3. Régressions linéaires.....	192
4.5.3.3.1. Performance	192
4.5.3.3.2. Sentiment de présence.....	192
4.5.3.3.3. Cybermalaises.....	193
5. Discussion	194
5.1. Neuroprésence : étude sur les fonctions exécutives	194
5.1.2. Modalités, genre et performance	194
5.1.3. Performance et facteurs humains en modalité virtuelle	194
5.1.4. Effet du stress	197
5.1.5. Limites et perspectives	199
5.1.6. Conclusion de l'étude	200
5.2. Spatioprésence : étude sur la cognition spatiale	202
5.2.1. Présence, facteurs humains et cognition spatiale	202
5.2.2. La nature de la relation présence – performance.....	206
5.2.3. Limites et perspectives	209
5.2.4. Conclusion de l'étude	210
5.3. Nav(i)r : étude sur l'évolution de la dépendance au champ	212
5.3.1. Sentiment de présence.....	212
5.3.1.1. Présence et présence historique	212
5.3.1.2. Présence et dimensions de présence	212
5.3.2. Mesure de la pratique des jeux vidéo	213
5.3.3. Evolution de la dépendance au champ.....	213

5.3.4. Limites et perspectives	216
5.3.5. Conclusion de l'étude	217
5.4. Eduprésence : étude sur l'apprentissage	219
5.4.1. Présence et performance d'apprentissage	219
5.4.2. Modération des facteurs humains	219
5.4.3. Distance par rapport au point de référence stéréoscopique	221
5.4.4. Mesure de l'expérience vidéoludique	222
5.4.5. Limites et perspectives	223
5.4.6. Conclusion de l'étude	224
5.5. Analyses transversales	225
5.5.1. Analyses intragroupes	225
5.5.2. Analyses intergroupes	225
5.5.3. Analyses agrégées	226
5.5.4. Limites et perspectives	228
5.5.5. Conclusion des analyses transversales	228
6. Conclusion	229
6.1. Modèle conceptuel	230
6.1.1. Lecture et interprétation	232
6.1.2. Equations symboliques	234
6.1.3. Esquisse algorithmique	239
6.1.4. Discussion et conclusion	244
6.2. Recommandations méthodologiques	247
6.2.1. Facteurs humains et biais expérimentaux	247
6.2.1.1. Présence et dimension écologique	247
6.2.1.2. Vers une standardisation et normalisation des tests en réalité virtuelle	249
6.2.2. La réalité virtuelle expérimentale	250
6.2.2.1. Phase de conception de l'expérimentation	250

6.2.2.2. Phase de passation de l'expérimentation	252
6.2.2.3. Phase de traitement des données.....	253
6.3. Synthèse & perspectives.....	255
Références bibliographiques	257
Annexes	319
Annexe 1 : Questionnaire sur l'Etat de Présence	319
Annexe 2 : Questionnaire sur les Cybermalaises.....	322
Annexe 3 : Vue première personne du Test de la Baguette et du Cadre virtuel	323

Liste des tableaux

Tableau 1. – Représentation graphique des hypothèses dans l'étude Neuroprésence.	136
Tableau 2. – Représentation graphique des hypothèses dans l'étude Spatioprésence.	144
Tableau 3. – Représentation graphique des hypothèses dans l'étude Eduprésence.....	162
Tableau 4. – Matrice de corrélations de Pearson de l'étude Nav(ir).....	180
Tableau 5. – Matrice de corrélations de Pearson de l'étude Eduprésence.	185
Tableau 6. – Matrice de corrélations de Pearson des différentes études.....	190
Tableau 7. – Modèle prédicteur des cybermalaises sur les des données agrégées.	193

Liste des figures

Figure 1. – Continuum de virtualité de P. Milgram & Kishino (1994).	37
Figure 2. – Représentation graphique de la loi de Moore.....	42
Figure 3. – Vue extérieure de la CAVE du Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle.....	44
Figure 4. – Visite virtuelle guidée lors d'une Nocturne du Plan de Rome.	49
Figure 5. – Une astronaute de la NASA portant un casque de réalité virtuelle.	57
Figure 6. – Vue première personne du jeu en réalité virtuelle Starwalker.....	61
Figure 7. – Représentation graphique du téléopérateur Curiosity de la NASA.	71
Figure 8. – Visualisation du modèle de la présence spatiale de Wirth et al. (2007).....	94
Figure 9. – Visualisation du modèle présence - performance de Bystrom et al. (1999).....	129
Figure 10. – Présentation schématique des hypothèses de travail concernant les associations entre les différentes variables et leurs directions.	132
Figure 11. – Vue première personne de la modalité réalité virtuelle du Wisconsin Card Sorting Test de l'étude Neuroprésence	139
Figure 12. – Vue première personne de l'environnement virtuel de l'étude Spatioprésence.....	143
Figure 13. – Vue aérienne de l'environnement virtuel de Spatioprésence.	148
Figure 14. – Vue première personne de l'environnement virtuel d'Eduprésence.	163
Figure 15. – Représentation graphique des résultats de l'ANOVA sur la performance au Wisconsin Card Sorting Test de l'étude Neuroprésence.....	170
Figure 16. – Représentation graphique de l'analyse par composantes principales au sein de l'étude Neuroprésence.	171
Figure 17. – Représentation graphique (nuage de points) de l'analyse en composantes principales de la modalité réalité virtuelle de l'étude Neuroprésence.....	172
Figure 18. – Représentation graphique des corrélations dans l'étude Spatioprésence.	175
Figure 19. – Représentation graphique de l'analyse en composantes principales de l'étude Spatioprésence.	176
Figure 20. – Représentation graphique en violon de la répartition de l'échantillon de l'étude Nav(i)r en trois groupes différents selon leur ratio d'évolution de la dépendance au champ avant (A) et après (B) l'immersion en réalité virtuelle.....	181
Figure 21. – Représentations graphiques des résultats des ANOVAs sur les variables – dépendance au champ pré-immersion et (A) et post-immersion (B), cybermalaises et sentiment de présence selon les groupes de l'étude Nav(i)r.	183

Figure 22. – Représentation graphique de l'analyse en composantes principales dans l'étude Eduprésence.	186
Figure 23. – Représentation graphique de l'analyse en composantes principales sur les données agrégées des trois expérimentations.	191
Figure 24. – Représentation graphique (nuage de points) de l'analyse en composantes principales sur les données agrégées des trois expérimentations.	192
Figure 25. – Représentation graphique du modèle de l'angle φ	231

A tous celles et ceux qui éveillent et entretiennent la curiosité.

Remerciements

Mes remerciements iront naturellement en premier lieu au trio de direction et d'encadrement de cette thèse : Philippe Fleury, Patrice Renaud et Leslie Decker. Philippe pour sa force calme, organisée et déterminée sur laquelle il est toujours possible de s'appuyer lorsque le reste devient instable, Patrice pour la justesse et la précision de ses raisonnements pertinents et affûtés et Leslie pour la beauté de sa curiosité scientifique toujours stimulante et stimulée ainsi que pour la rigueur, l'intelligence, la qualité mais aussi la bienveillance de son accompagnement.

Je tiens ensuite à remercier les nombreux acteurs administratifs et scientifiques qui ont permis le bon déroulement de cette thèse en cotutelle, ce qui n'était pas toujours une mince affaire. Dans ce cadre, je voudrais plus précisément remercier Jean-Louis Vercher, Franco Lepore, Daniel Mestre, Sylvie Belleville et Emilie Loup-Escande pour avoir accepté d'évaluer ce travail. J'aimerais également remercier tous les membres du CIREVE SH209, à titre individuel – Philippe, Sophie, Nicolas, Karim, Charlie, Jérôme, Axel, Agnès, François – et collectif, autant pour leurs qualités humaines que professionnelles. Je souhaiterais également remercier Nadège Roche-Labarbe et Marc Aguert, membres constitutifs de mon comité de suivi de thèse qui ont réalisé ce rôle à la perfection. Je ne pourrais dresser une liste de remerciements sans inclure ceux avec qui j'ai collaboré durant ces années. Je pense ici à Emma Dupuy et Hadrien Ceyte, mais aussi à Guillaume, Sara, Valérie, Charline, Pauline, et bien évidemment, Blandine, qui a tant fait pour ce travail.

Je souhaite aussi remercier toutes les individualités (amis, famille, professeurs, étudiants) auprès de qui j'ai vécu et dont la (co)présence et les conversations ont stimulé cette thèse. J'en profite pour remercier tous les inconnus et connus croisés au bord du chemin qui se sont intéressés à ce travail et dont la belle curiosité n'a jamais cessé de m'encourager. Dans la lignée des remerciements anonymes, je me dois également d'inclure tous les constructeurs du web dont les contenus et discussions ont largement contribué à ma formation et à la réalisation de cette thèse, ainsi que tous les scientifiques, techniciens, écrivains et autres philosophes qui ont posé des pierres sur lesquelles j'ai pu m'appuyer. Enfin, et pour rester dans les remerciements anonymes, il me semble fondamental de remercier tous les participants des études expérimentales réalisées. En ces temps où les données personnelles et leurs analyses – voire manipulations – comportementales constituent des enjeux planétaires, il est nécessaire de rappeler qu'elles sont aussi au cœur des sciences sociales et de l'Homme, et que celles-ci n'ont pour seules différences que leurs aspirations humanistes.

1. Introduction

« *Virtual reality is the technology of noticing experience itself* » (Lanier, 2017)

La réalité virtuelle est un mème (Dawkins et al., 1989), culturellement transversal et scientifiquement transdisciplinaire. Tour à tour cliché de science-fiction, concept philosophique ou emballément marketing industriel, son nom oxymorique résonne en ce début de XXI^e siècle avec celui de l'intelligence artificielle. Tous deux, nés dans la deuxième moitié du court mais terrible XX^e siècle (Hobsbawm, 1994), suscitent un rapport controversé à la technologie issu des turpitudes et tumultes de ces décennies. Ces deux expressions, dont la construction linguistique similaire n'est pas anodine, partagent dans leurs évocations des inquiétudes graves, parfois apocalyptiques, mais aussi des espoirs futuristes dignes de mythes prophétiques. Ces quatre mots inspirent aux romanciers, politiciens, scientifiques et citoyens des histoires sombres, des discours dissonants, des débats enflammés et des spéculations folles. Au-delà de leurs connotations socio-culturelles, les concepts d'intelligence artificielle et de réalité virtuelle partagent d'autres similarités ; ils reposent tout d'abord et bien évidemment sur le développement des sciences et techniques informatiques, mais surtout ils sont inspirés par et ont pour vocation plus ou moins latentes la reproduction et le dépassement de la cognition humaine, comme le montre le nom du célèbre article de Turing de 1950 : *The Imitation Game* (Turing, 1950/2009). Ce nom évocatoire, utilisé par Alan Turing pour décrire un agent artificiel considéré intelligent, pourrait tout aussi bien représenter la quête des scientifiques de la réalité virtuelle qui n'ont de cesse de mieux reproduire la cognition humaine afin de mieux la tromper, mais surtout de mieux la comprendre. Il n'est d'ailleurs pas anodin que ce soit Marvin Minsky, fondateur du Artificial Intelligence Laboratory du Massachusetts Institute of Technology, qui baptise le nom de cette duperie cognitive (1980), qu'il nomme *telepresence* et qui deviendra le cœur et symbole de la réalité virtuelle, ainsi que l'objet d'étude de cette thèse. Cette (télé)présence sera popularisée par sa définition première, purement phénoménologique : le sentiment d'être là, *of being there* (Heeter, 1992), qui n'est pas sans rappeler, comme nous le verrons, le *Dasein* ou « l'être-là » de Heidegger (Dreyfus, 1991; Heidegger, trad. 1992). Etudier le sentiment de (télé)présence ce n'est pas seulement étudier la réalité virtuelle et travailler à son développement, c'est aussi appréhender une nouvelle approche scientifique de la cognition humaine : une approche transdisciplinaire intégrant les multiples héritages de ses différentes ramifications dans laquelle l'interaction de l'Homme avec son milieu y est fondamentale, mais surtout artificielle, et donc contrôlée, mais aussi modulable, parfois bien au-delà

du respect élémentaire de la physique. Cette approche, aussi bien fondamentale que méthodologique, est en plein développement. Ses raisonnements théoriques et ses applications pratiques potentiellement infinies attirent les curieux des sciences cognitives, philosophiques et informatiques, et rares sont les domaines qui ne sont pas ou ne seront pas impactés : il en est donc d'autant plus nécessaire d'en proposer une investigation approfondie.

En effet, de nombreuses zones d'ombre subsistent autour de la réalité virtuelle, et notamment de son fameux sentiment de présence. Certaines d'entre elles, si non éclaircies, pourraient se révéler être de larges marécages rendant la construction d'un cadre fondamental et méthodologique impossible. Ces zones d'ombre concernent principalement l'impact en tant que tel du sentiment de présence. En effet, malgré une appréhension respectable du phénomène en question, l'impact que le sentiment de présence possède réellement sur l'expérience virtuelle, et notamment sur la performance du participant, reste globalement mystérieux. Tellement mystérieux que peu nombreux sont les auteurs à avoir interrogé cette question, alors même que celle-ci fut soulevée à l'aube de la réalité virtuelle (Barfield et al., 1995) :

It is also necessary to develop a basic research program to investigate the relationship between presence and performance using virtual environments. [...] we need to determine when, and under what conditions, presence can be a benefit or a detriment to performance.

Alors que nombre d'utilisateurs de l'outil préfèrent l'évincer, cette question demeure fondamentale : comment peut-on comprendre et a fortiori utiliser un outil amené à devenir omniprésent (en recherches, diagnostics, réhabilitations, thérapies, jeux, communications ...) si nous n'analysons pas l'effet même qu'il engendre ? Si cette question est aussi peu étudiée, c'est non seulement parce qu'elle est à la frontière de plusieurs disciplines, mais aussi de plusieurs cadres conceptuels de la cognition (Coelho et al., 2009). Mais c'est surtout parce qu'elle s'est révélée être particulièrement complexe, et ce pour plusieurs raisons, au-delà de résultats empiriques improbants. Tout d'abord, parce que le sentiment de présence, phénomène par nature subjectif, est difficile à mesurer avec précision, que les différents outils proposés sont toujours controversés et ne permettent pas ou mal de rendre compte de sa nature dynamique. Ensuite, parce que toute une série de facteurs humains et ergonomiques (les plus connus étant les cybermalaises) s'invitent continuellement dans la danse pour influencer soit le sentiment de présence, soit la performance, soit les deux, rendant au passage l'évaluation de l'un et de l'autre ou de leur relation des plus épineuses. S'additionne à cela la multitude de formes que le concept de performance peut prendre en réalité virtuelle ; il peut aussi bien solliciter lourdement la mémoire de travail via des compétences exclusivement cognitives ou métacognitives (une partie d'échecs entre joueurs expérimentés) comme

des capacités de motricité fine (simulateur chirurgical) ou des habiletés sociales interpersonnelles (coprésence ou utilisation d'avatars). Enfin, la dernière et peut-être principale difficulté réside dans le fait que l'inférence d'une direction causale semble impossible : est-ce le sentiment de présence, la sensation « d'être là » qui augmente la performance lors d'une tâche de navigation spatiale, ou est-ce le traitement de l'information spatiale qui permet à l'individu de faire émerger ce sentiment de présence ? Ou encore est-ce un facteur annexe qui favorise indépendamment chacun des phénomènes de façon concomitante ? Toutes ces problématiques, pourtant nécessaires et fondamentales pour une compréhension du concept et de l'outil, font de la question du sentiment de présence et de sa relation avec la performance un casse-tête conceptuel et méthodologique.

Résoudre, ou du moins tenter de résoudre ce casse-tête pourrait pourtant nous en apprendre beaucoup, non seulement sur l'outil de la réalité virtuelle et son utilisation, mais aussi sur le fonctionnement général de la cognition humaine et notamment de ses interactions avec l'environnement. C'est l'objectif auquel est dédié ce présent travail. En effet, la réalité virtuelle manque aujourd'hui cruellement d'un modèle théorique général du sentiment de présence, englobant non seulement les facteurs issus de l'humain et du système le constituant mais aussi sa relation avec la performance. La conceptualisation de ce modèle théorique est le moyen proposé par cette thèse doctorale afin de répondre à l'objectif précédemment mentionné. Afin de réaliser cette conceptualisation, il est bien évidemment nécessaire de dissenter sur la nature du sentiment de présence, d'investiguer la relation qu'il entretient avec la performance, mais également d'évaluer les facteurs humains et systèmes en jeu ainsi que leurs potentiels rôles modérateurs sur cette relation. Après une présentation historique, culturelle et technique de la réalité virtuelle, de ses taxonomies, applications et apports, puis de l'émergence du concept de sentiment de présence, ce travail de recherche débute par une revue de littérature scientifique de ce dernier, explorant ses différentes définitions et considérations, ses diverses évaluations ainsi que les nombreux facteurs humains et systèmes qui lui sont associés. Puis, les relations entre sentiment de présence et performance sont discutées, notamment au regard des différentes et parfois divergentes théories de la cognition. Vient ensuite une présentation générale des objectifs et problématiques du travail décrivant les trois études expérimentales réalisées durant cette thèse : leurs méthodes et hypothèses sont détaillées, et leurs résultats présentés puis discutés. Les données empiriques de ces trois études font également l'objet d'analyses et de discussions transversales intégrées et confrontées aux connaissances de la littérature. Puis, une synthèse du travail est présentée, et un modèle théorique général du sentiment de présence en est extrait, ainsi que différentes recommandations méthodologiques destinées aux acteurs du domaine. Enfin, des perspectives futures pour ce modèle et plus globalement pour ce travail sont proposées.

2. Cadre théorique

2.1. La réalité virtuelle

2.1.1. Définitions

2.1.1.1. Réalité(s)

Avant de définir le terme de réalité virtuelle, il est nécessaire de discuter préalablement la notion de réalité. Ce concept commun, issu d'une expérience phénoménologique inexorable et quotidienne est en effet largement controversé, et sa définition dépend notamment des cadres théoriques adoptés par chacun des auteurs. Les tenants d'un courant objectiviste considèrent par exemple la réalité comme l'état des choses existantes et indépendantes de l'esprit, alors que les constructivistes ou subjectivistes soutiennent qu'il n'existe de réalité que perçue et donc que celle-ci n'est jamais extérieure, indépendante. Prenons l'exemple d'un psychologue dont le patient se plaint de symptômes positifs hallucinatoires, par exemple de voix étrangères s'adressant à lui. Il serait particulièrement mal venu de la part du thérapeute de considérer ces manifestations psychiques comme irréelles et donc de ne pas les prendre en compte car elles n'ont pas de bases physiques apparentes : il n'existe effectivement pas, dans la réalité physique du psychologue, de voix s'adressant à son patient. En cela, un subjectiviste considère que seule la réalité subjective du sujet est réelle et doit donc être prise en compte. Un objectiviste pourrait rétorquer que les bases physiques réelles de ces hallucinations trouvent leurs substrats dans le cerveau de l'individu, par exemple dans la jonction tempo-pariétale droite (Plaze et al., 2011), et que la quête de la science consiste dans le fait de s'approcher au plus près de la compréhension de la réalité objective, extérieure. Malgré l'intérêt évident de cette question, l'établissement de la nature de la réalité ne constitue pas le but de cette thèse, et nous ne saurions prendre parti sans réflexions approfondies. De ce fait, et nonobstant les considérations actuelles sur la nature simulée de l'univers avancées par Nick Bostrom (2003), les termes de « réalité primaire » ou de « réalité physique » seront utilisés dans ce travail pour rendre compte de la réalité quotidienne comme expérience phénoménologique non virtuelle (Pillai et al., 2013). La réalité primaire (ou physique) réfère donc dans ce travail à la représentation ou construction de l'environnement immédiat par le sujet, non médiée par la technologie humaine de la réalité virtuelle.

2.1.1.2. La réalité virtuelle

Revenons à l'objet d'étude de cette thèse. Il convient tout d'abord de noter que le terme de réalité « virtuelle », pour *virtual reality*, pose un léger litige de traduction en français. En effet, le mot « virtuel » est devenu en français synonyme de « numérique » ou de « immatériel », en opposition avec le premier mot de l'expression, « réalité ». Cependant, sémantiquement et dans les deux langues, le contraire de « virtuel » n'est pas « réel », mais « actuel » (Maïlat, 2008). Le terme de « virtuel », issu de *virtus*, signifiant « vertu », « force », « puissance » en latin, serait plutôt synonyme de « possible » ou de « potentiel ». Cette distinction, plus saillante en anglais, ne sépare pas le virtuel du réel. La réalité virtuelle est donc bien réelle. Une traduction comme « réalité potentielle » ou « quasi-réalité » rendrait mieux compte, bien que moins esthétique, de l'esprit originel de l'expression anglaise baptisée par Jaron Lanier (Bryson, 2013).

L'expression « réalité virtuelle » n'existe ni dans le *Larousse*, ni dans le *Robert*. En anglais, le *Cambridge Dictionary* en donne la définition suivante : « a set of images and sounds, produced by a computer, that seem to represent a place or a situation that a person can take part in » (“Virtual Reality,” 2020). Cette définition est légèrement surprenante en ce qu'elle énonce deux modalités sensorielles en occultant les autres (quid de l'haptique ou des odeurs, par exemple). Elle exclut ensuite les outils non numériques, puis fait appel à la représentation d'un environnement comme lieu ou situation, ce qui peut référer à la présence spatiale, que nous définirons plus tard mais qui peut être comprises comme le sentiment « d'être là dans l'espace virtuel ». Enfin, elle évoque l'interaction avec ce même environnement. Cette définition reprend peu ou prou l'intégralité des aspects constitutifs des définitions de la réalité virtuelle. En effet, *L'Encyclopedia Britannica* donne quant à elle de la réalité virtuelle la définition suivante (Lowood, 2020) :

Virtual reality, the use of computer modeling and simulation that enables a person to interact with an artificial three-dimensional visual or other sensory environment.

Si les différentes modalités sensorielles sont cette fois-ci évoquées, cette définition rappelle elle aussi le besoin de la qualité numérique de l'interface et les capacités interactives du système. Cependant, elle ne parle plus de lieu, mais d'environnement. L'encyclopédie libre *Wikipedia* donne – en anglais – la définition suivante (“Virtual Reality,” 2020b) :

Virtual reality is a simulated experience that can be similar to or completely different from the real world. Currently standard virtual reality systems use either virtual reality headsets or multi-projected environments to generate realistic images, sounds and other sensations that simulate a user's physical presence in a virtual environment. A person using virtual reality equipment is able to look

around the artificial world, move around in it, and interact with virtual features or items.

La définition française de la réalité virtuelle sur *Wikipedia* est relativement similaire, à la différence qu'elle exclut les systèmes non numériques ("Réalité Virtuelle," 2020). Une définition francophone communément reconnue est celle du Traité de la Réalité Virtuelle (Fuchs et al., 2006) :

La réalité virtuelle va lui permettre [à l'homme] de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de temps, de lieu et (ou) de type d'interaction : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique.

Toutes ces définitions sont semblables, et pour cause elles ont pour origine commune la définition de Steve Bryson, un collègue de Jaron Lanier à VPL Research. Dans un court essai, Bryson (2013) définissait dans les années 1990 la réalité virtuelle comme :

The use of computer technology to create the effect of an interactive three-dimensional world in which the objects have a sense of spatial presence.

Tous les aspects des définitions précédemment évoquées sont retrouvés et discutés : l'utilisation d'ordinateurs, nécessaire afin de distinguer la réalité virtuelle des téléopérations, la perception visuelle notamment 3D pour exclure les programmes 1D et 2D, l'interaction avec l'environnement, pour distinguer la réalité virtuelle des formes d'animation classiques, et enfin la sensation de lieu virtuel, permettant aux objets d'avoir une impression de présence spatiale. Dans son essai, Steve Bryson disserte également sur l'expression de Lanier de *virtual reality* considérée à l'époque comme trop oxymorique par certains auteurs, notamment du monde académique qui lui préfère longtemps le terme de *virtual environment*. Bryson analyse puis assemble alors les différents termes composant l'expression (Bryson, 2013) :

- Virtual: to have the effect of being such, without actually being such.
- Reality: the property of being real.
- Real: the property of having concrete existence.
- Virtual reality: to have the effect of having concrete existence, without actually having concrete existence.

Ce qui est, il faut l'admettre, une définition non seulement très adéquate de ce qui rend l'expérience de la réalité virtuelle aussi particulière, mais également une définition rendant pleinement compte des nombreux attraits et applications de cette technologie, sans la limiter à ce qu'elle est actuellement.

2.1.1.3. Le continuum de virtualité

Avant d'examiner les applications de la réalité virtuelle, il convient de placer celle-ci au sein du spectre des réalités dites étendues, ou XR, pour X la variable représentant les différentes technologies actuelles ou futures interférant avec le R de *reality*, et qui s'insère lui-même sur le continuum de virtualité de P. Milgram & Kishino (1994) représenté graphiquement en Figure 1. En effet, et même si la réalité virtuelle et la réalité augmentée partagent de nombreuses similarités, notamment technologiques, elles ne peuvent pas être appréhendées de la même façon. Dans la réalité virtuelle, le sujet est coupé du monde extérieur, puisqu'il est transporté dans un environnement virtuel synthétique. C'est le sentiment de *spatial presence* dont parle Bryson. Dans la réalité augmentée, c'est l'inverse ; des bribes virtuelles sont incorporées dans la réalité physique du participant. Evidemment, si suffisamment de paramètres ou d'objets virtuels sont ajoutés à la réalité physique du sujet, il adviendra un moment où celui-ci basculera dans la réalité virtuelle : la distinction n'est pas bimodale, il s'agit comme l'ont présenté P. Milgram & Kishino (1994) d'un continuum avec à un bout la réalité physique, et à l'autre la réalité virtuelle. Tout ce qui est entre ces deux points peut être appelé « réalités mixtes », et l'ensemble des points du continuum correspond aux « réalités étendues ». Le présent travail ne s'intéresse qu'à la question de la réalité virtuelle au sens strict du terme, celle qui a pour but de faire émerger un sentiment de présence spatiale dans un lieu autre que celui de la réalité physique du participant. Et cela même si l'environnement spatial physique et l'environnement spatial virtuel coïncident : en recréant synthétiquement et de façon photo-réaliste la salle dans laquelle le participant est entré en réalité virtuelle et se situe physiquement, il est nécessaire de considérer que son sentiment de présence sera dirigé dans un autre endroit, puisque les deux environnements n'évolueront pas de la même manière ; par exemple, un vase cassé dans l'un ne le sera pas dans l'autre. A contrario, la réalité augmentée n'a pas pour but de déplacer le sentiment de présence du sujet, mais de l'altérer.



Figure 1. – Continuum de virtualité de P. Milgram & Kishino (1994).

2.1.2. Historique

Cette partie est destinée à rendre compte non seulement de l'émergence et de l'évolution technologique de la réalité virtuelle, mais également du développement culturel du concept. En effet, et peut-être encore plus que d'autres technologies, le développement de la réalité virtuelle s'est inspiré – autant qu'il a inspiré – de nombreuses références culturelles qu'il est nécessaire d'appréhender pour s'assurer une compréhension la plus exhaustive possible du concept.

2.1.2.1. Histoire du concept

L'idée de réalité virtuelle apparaît bien avant sa réalisation fonctionnelle en tant que technologie. Nombreux sont les auteurs à faire débiter cette histoire par l'allégorie de la caverne de Platon (Platon, trad. 2002), notamment car les inventeurs de la CAVE, une des technologies de réalité virtuelle, l'ont baptisée ainsi en hommage au célèbre philosophe grec (Cruz-Neira et al., 1992). Dans un dialogue entre Socrate et Glaucon de *La République*, Platon présente cet exercice de pensée bien connu : des individus sont enfermés et attachés dans une caverne depuis leur enfance, n'ayant pas d'autre choix que de regarder face à eux. Derrière eux, un feu constitue la seule source de lumière. Des personnes extérieures, marchant contre les murs obscurs pour ne pas se faire remarquer, utilisent des objets représentant « des hommes et d'autres choses vivantes » entre le feu et les prisonniers, de façon à projeter des ombres sur le mur illuminé. Socrate suggère ainsi que pour les prisonniers, ces ombres constituent la réalité, alors qu'elles ne le sont pas : c'est le soleil à l'extérieur de la caverne qui représente les choses naturelles. Bien que Platon utilise principalement les artifices de la caverne pour symboliser les doctrines politiques, la comparaison avec la tromperie des sens inhérente à la réalité virtuelle est aisée. Il est d'autant plus intéressant que les artistes qui manipulent les objets sur le feu pour projeter les ombres utilisent non seulement la même technique de rétroprojection que celle employée dans le cadre de la CAVE, mais ils utilisent également la congruence perceptive entre les modalités visuelles et auditives : ils font parler les objets, et le son de leur voix est attribué aux ombres à cause de l'écho de la caverne. Or, cette congruence perceptive est considérée aujourd'hui comme une qualité immersive centrale de la réalité virtuelle.

L'allégorie de la caverne inspirera nombre d'auteurs et d'artistes de la réalité virtuelle, parfois sous d'autres noms mais souvent avant que celle-ci soit techniquement fonctionnelle. Une des références explicites régulièrement utilisées dans l'histoire de la réalité virtuelle est celle d'Antonin Artaud. Dans *Le Théâtre et son double*, l'auteur évoque cette réalité virtuelle pour qualifier les événements de la scène qui pour lui constituent la réalité (Artaud, 1985) ; le parallèle entre les ombres sur le mur de la caverne éclairé et les acteurs sur la scène théâtrale est aisé. Mais c'est

très vite la science-fiction qui s'empare du concept de réalité virtuelle jusqu'à en faire un cliché du genre. Lorsque Marvin Minsky nomme la conséquence subjective de la réalité virtuelle la *telepresence*, il ne peut s'empêcher de citer ses nombreuses références de science-fiction, parmi lesquelles Isaac Asimov, Robert Heinlein et Carl Sagan (Minsky, 1980). Les œuvres cinématographiques ou bibliographiques développant le concept sont trop nombreuses pour une revue complète, mais il est possible d'en citer les premières, comme *Pygmalion's Spectacles*, *The Man Who Awoke* ou encore *Neuromancer* pour la littérature (W. Gibson, 1984; Manning, 1975; Weinbaum, 2004). Dans *Pygmalion's Spectacles*, dont la première édition date de 1935, l'auteur décrit un professeur qui a inventé une paire de lunettes particulièrement semblable à un casque de réalité virtuelle. Ces lunettes permettraient en effet :

[...] a movie that gives one sight and sound [...] taste, smell, and touch. [...] You are in the story, you speak to the shadows (characters) and they reply, and instead of being on a screen, the story is all about you, and you are in it.

Alors que les ordinateurs n'existent pas encore, l'auteur prédit ici l'apparition des casques de réalité virtuelle en passant par une référence directe à Platon avec les « ombres ». Concernant les œuvres cinématographiques, la série *Welt am Draht* ainsi que le film *Brainstorm* figurent dans la liste des premiers à s'en emparer. Dans *Brainstorm*, une équipe de scientifiques cherche à perfectionner un système capable de reproduire les expériences sensorielles et émotionnelles d'un sujet, alors que la série *Welt am Draht* représente une simulation informatique à grande échelle (Fassbinder, 1973; Trumbull, 1983). Mais c'est bien la franchise *The Matrix* qui propulsera le concept de réalité virtuelle comme pilier de la science-fiction cinématographique, engendrant plus tard *Avatar* ou *Black Mirror* (Brooker, 2014; J. Cameron, 2009; The Wachowskis, 1999). Il convient de noter à nouveau la puissante filiation entre *The Matrix*, univers dystopique dans laquelle les Hommes sont, sans le savoir et contre leur gré, piégés dans une réalité virtuelle imposée par une intelligence artificielle forte, et l'allégorie de la caverne de Platon. En effet, dans la suite du dialogue de Platon, un homme parvient à s'échapper de la caverne, puis décide finalement d'y retourner, à l'instar de Néo dans *The Matrix*. A travers ces œuvres, les bénéfiques mais surtout les dangers que peuvent provoquer les potentialités de la réalité virtuelle décrits par les artistes et écrivains ont eu tôt fait d'inscrire le concept immersif dans la culture populaire. Aussi, nombreux sont les journaux à avoir axé leur ligne éditoriale sur la réalité virtuelle, mêlant vulgarisations scientifique et technologique, marketing et conseils commerciaux pour jouer sur l'aspect répulsion-fascination de l'outil, à l'instar d'une vidéo virale récente sud-coréenne où l'on voit une mère revivre une scène avec sa petite fille décédée et réincarnée virtuellement (*Woman's Deceased Daughter "Resurrected" in VR: Unethical or the Future?*, 2020).

Du côté scientifique, la recherche sur le concept de réalité virtuelle est issue de domaines très différents : tout d'abord celui des sciences informatiques, mais aussi de l'optique, de l'électronique, de la philosophie, des arts, des sciences cognitives et neurosciences, de la psychologie clinique, des sciences du mouvement, de l'ergonomie, parmi d'autres (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006; Sanchez-Vives & Slater, 2005). De grands organismes gouvernementaux ou privés ont participé et participent à ces recherches, et il n'est pas rare pour une revue de littérature du domaine d'être constituée de rapports d'agences militaires ou spatiales. Étant affiliées à des disciplines scientifiques différentes, ces recherches sont publiées de façon disparate selon leurs angles d'approche. Cependant, certaines revues ont su faire de l'outil même de la réalité virtuelle un angle catalyseur de recherches. La plus emblématique d'entre elle, issue des presses du MIT est *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* dont le premier numéro, en 1992, ainsi que ses successeurs, recensent grand nombre d'articles fondateurs du domaine. On peut également citer, de façon non exhaustive, d'autres revues scientifiques plus ou moins récentes comme : *Virtual Reality*, *Frontiers in Virtual Reality*, *Computers in Human Behavior*, *CyberPsychology & Behavior*, *Experimental Brain Research*, *Human-Computer Interaction*, *Human Factors and Ergonomics*. La réalité virtuelle nécessitant souvent du matériel onéreux et des compétences techniques précises, des laboratoires spécialisés ont vu le jour partout sur la planète, comme le Media Lab du MIT, ou du côté francophone le Laboratoire de Cyberpsychologie de l'Université du Québec en Outaouais, ou encore le Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle (CIREVE) de l'Université de Caen Normandie où cette présente thèse est écrite. Ces laboratoires sont souvent regroupés ou fédérés par différents centres ou pôles, telles l'Association Française de Réalité Virtuelle ou l'International Society for Presence Research. Aujourd'hui, la grande majorité des universités travaillent, d'une façon ou d'une autre, avec ou sur le concept de réalité virtuelle. Pour une visualisation des réseaux de citations, de laboratoires, de pays et d'auteurs travaillant sur la réalité virtuelle, voir les analyses infographiques de Cipresso et al. (2018).

2.1.2.2. Histoire de la technique

L'histoire de la technique de la réalité virtuelle commence par la représentation de l'environnement dans lequel l'Homme évolue. Le système perceptif humain étant largement dominé par la modalité visuelle (Stokes et al., 2014), il n'est pas étonnant que cette représentation le soit également. Certains auteurs ont énoncé les peintures préhistoriques comme celles de la grotte de Lascaux (Ruspoli, 2003) comme de lointains ancêtres de nos environnements virtuels (Cutting, 1997; Fontanesi & Renaud, 2014; Mioduser et al., 2002). Il est par ailleurs intéressant de noter que les

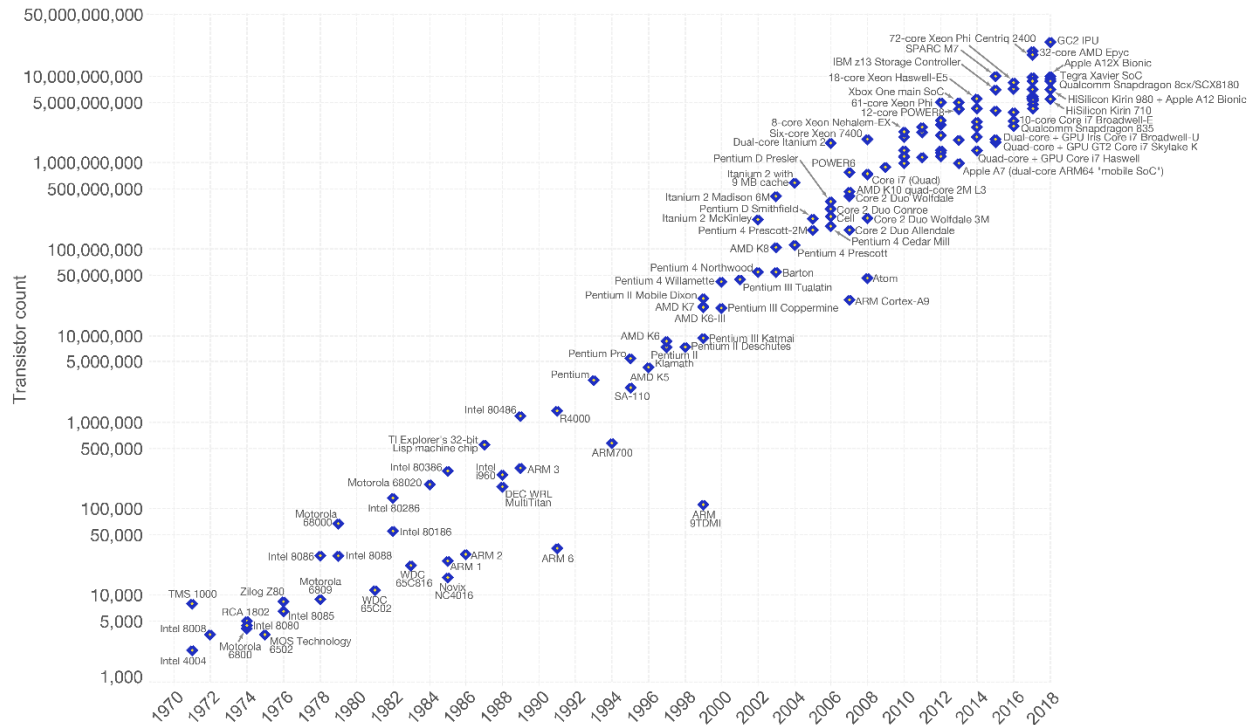
reconstitutions virtuelles de ces grottes sont courantes, ce que l'on pourrait s'aventurer à considérer comme un hommage atemporel (Fritz et al., 2010). Par la suite, les tableaux, sculptures, photographies et d'autres médias se sont emparés du rôle de représentation du monde. C'est notamment le cas des larges tableaux panoramiques restituant des scènes entières de l'histoire humaine et s'approchant du format des grands écrans de cinéma ; du mythe de Pygmalion qui rend réelle une représentation « virtuelle » de la femme, ou encore des frises brodées, sculptées ou peintes reconstituant des événements historiques, telles la Tapisserie de Bayeux ou la colonne Trajane relatant respectivement les épopées normandes outre-Manche et les conquêtes de l'empereur du même nom. Certains auteurs ont également présenté le courant littéraire naturaliste voire l'écriture au sens général comme un outil d'immersion du lecteur dans une période et un lieu donnés (Ryan, 1999, 2015). Cette immersion de la lecture dans un monde virtuel et les potentiels dangers (souvent fantasmés) qui en découlent sont d'ailleurs les thèmes récurrents de nombreux romans. Don Quichotte de la Manche ou encore Madame Bovary sont représentatifs de ce phénomène : à certains égards, ces personnages sont bien plus présents dans leurs réalités « virtuelles », celle de la lecture et de l'imaginaire, que dans celle, physique, de leurs contemporains. C'est d'ailleurs les décalages entre leur réalité virtuelle et leur réalité physique qui constituent le sujet de ces œuvres. Il peut être intéressant de noter une autre similarité entre ces personnages et la réalité virtuelle : contrairement à la simple lecture, Madame Bovary et Don Quichotte de la Manche ont désiré devenir acteurs de leur réalité virtuelle, et non plus simples spectateurs. Cette transition entre spectateur et acteur de la représentation imaginaire est une des spécificités de la réalité virtuelle (Fuchs, Moreau, Berthoz, et al., 2006).

Mais c'est réellement la découverte de la vision stéréoscopique binoculaire (Wheatstone, 1838), puis la construction du stéréoscope qui ouvre le bal des inventions qui aboutira à la réalité virtuelle telle que nous la connaissons aujourd'hui. Wheatstone démontre ainsi que le cerveau construit l'effet de profondeur en transformant deux images 2D, vues sur chacun des yeux, en une image 3D commune. Le principe à la base du fonctionnement du stéréoscope est toujours celui utilisé en réalité virtuelle pour créer la sensation de profondeur. Presque un siècle plus tard, dans les années 1920, Edward Link pose une nouvelle pierre avec son simulateur de vol électromécanique (Page, 2000). Cet avion virtuel, équipé de différents moteurs permettant de contrôler le tangage et le roulis mais aussi de simuler des turbulences, est le premier d'une longue histoire de simulateurs de vol. Il est possible qu'il ait inspiré, quelques années plus tard, le Sensorama de Morton Heilig (1962). Le Sensorama était un appareil lui aussi électromécanique qui à l'instar de la réalité virtuelle d'aujourd'hui combinait plusieurs technologies afin de couvrir un maximum de modalités sensorielles différentes : vidéo 3D en couleurs, sons, vibrations, odeurs, et même des soufflets

pour simuler le vent. Morton Heilig prototype durant ces mêmes années un *head-mounted display* et qu'il nommera le Telesphere Mask (1960). Celui-ci sera suivi quelques années après de l'article théorique décrivant la construction du *Ultimate Display* d'Ivan Sutherland (1965).

Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2018)

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important as other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – are linked to Moore's law.



Data source: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)
The data visualization is available at [OurWorldinData.org](https://www.ourworldindata.org). There you find more visualizations and research on this topic.

Licensed under CC-BY-SA by the author Max Roser.

Figure 2. – Représentation graphique de la loi de Moore.

Il convient de noter qu'un changement s'est opéré entre le Sensorama de Heilig et l'article de Sutherland: la technologie supportant la réalité virtuelle – qui n'est pas encore nommée ainsi – passe d'une base analogique à une base numérique. Or, c'est durant la même année 1965 qu'un électronicien publie un article décrivant la courbe quasi exponentielle de la puissance de calcul informatique basée sur l'augmentation croissante des transistors, article qui érigera une loi à son nom : la loi de Moore (G. Moore, 1965), représentée graphiquement en Figure 2. La croyance en cette prédiction est si forte que certains chercheurs se lancent dans de la construction technologique théorique bien trop ambitieuse pour la puissance contemporaine des ordinateurs, stimulant fortement l'innovation dans le domaine (Lanier, 2017). Ivan Sutherland, considéré comme le père des graphismes informatiques avec plus de 60 brevets dans le domaine et dont les travaux sont récompensés par pléthore de distinctions parmi lesquelles le Turing Award (Hosch, 2020), pose

les bases théoriques de la réalité virtuelle future : interaction avec l'environnement, intégration multisensorielle, fonctionnement en temps réel. Il écrit dans son célèbre article que « such a display could literally be the Wonderland into which Alice walked » (Sutherland, 1965). Trois ans plus tard, en collaboration avec ses étudiants, Sutherland révèle « *A head-mounted three dimensional display* » (1968), plus connu sous le nom d'Épée de Damoclès à cause de l'infrastructure nécessaire à son fonctionnement surplombant le participant. Une vidéo d'utilisation du casque est disponible (*Ivan Sutherland - Head Mounted Display, 2020*). Le casque de Sutherland comprend des capteurs de mouvement pour la position du casque ainsi qu'une sortie stéréoscopique numérique, faisant de nos systèmes actuels ses héritiers directs. Il convient de citer un autre pionnier de la réalité virtuelle, Myron Krueger, qui préférait lui le terme de *artificial reality* (Krueger, 1991), et qui s'est spécialisé dans l'interaction avec l'environnement virtuel. Après plusieurs travaux théoriques et appliqués sur l'interaction virtuelle dans les années 1970, Krueger délivre finalement son projet de longue date, le Videoplace, en 1975. Le Videoplace correspond à ce qu'il appelle une réalité artificielle et permet de positionner l'utilisateur dans un environnement interactif à l'aide de différentes caméras et traqueurs (Krueger et al., 1985). La particularité de cet outil réside dans le fait qu'il permet l'interaction entre plusieurs utilisateurs via un système d'ombres projetées sur des écrans. Le nom de l'outil évoque déjà ce qui deviendra la présence spatiale, et son fonctionnement la présence sociale. Quelques années plus tard, Jaron Lanier et Thomas Zimmerman fondent VPL Research, première entreprise d'une longue série d'entreprises développant et vendant des produits de réalité virtuelle. Le produit phare de VPL Research est et restera le DataGlove, qui donnera son nom par antonomase à l'utilisation de gants équipés de capteurs comme moyen d'interaction dans l'environnement virtuel (Harvill et al., 1992; Zimmerman, 1985; Zimmerman & Lanier, 1999). C'est d'ailleurs à cette période d'activité de VPL Research que l'on impute à Lanier la paternité du terme de *virtual reality* pour désigner la technologie, bien que le milieu académique ait continué (et continue) à employer *virtual environments* pendant de nombreuses années (Bryson, 2013; Krueger, 1991).

Dans les années 1990 apparaît une première tentative de démocratisation de la réalité virtuelle que les prix très élevés réservaient jusqu'ici aux centres de recherche et aux universités. Des jeux pour salle d'arcade ou de salons, commercialisés par des entreprises comme Sega (Wiltz, 2019) ou Nintendo (Edwards, 2015) voient alors le jour. Mais les années 1990 sont marquées plus en profondeur dans l'histoire de la réalité virtuelle par l'invention de la CAVE, acronyme récursif de *Cave Automated Virtual Environments* (Cruz-Neira et al., 1992). La CAVE est un environnement immersif où des projecteurs sont dirigés sur des murs autour d'une salle ainsi que sur le sol de celui-ci (Figure 3). L'utilisateur, équipé de lunettes stéréoscopiques et placé dans cette salle

peut donc voir les rendus graphiques en 3D flotter dans les airs, se promener autour et interagir avec eux. Une CAVE est associée à un système de capture de mouvement, magnétique ou infrarouge, généralement attachés aux lunettes et permettant ainsi aux ordinateurs de rendus graphiques de proposer du contenu en temps réel se superposant au regard de l'individu. Le système CAVE, bien que plus contraignant par son prix et par l'infrastructure nécessaire, possède un certain nombre d'avantages sur les casques de réalité virtuelle, le principal d'entre eux étant l'utilisation directe du corps du participant. Ceci permet non seulement un gain d'énergie, puisqu'il n'y a pas besoin de traquer l'intégralité du corps pour en faire une reconstitution virtuelle parfois instable, mais permet surtout d'éviter des incongruences entre proprioception (la perception par le corps) et système visuel, ce qui est souvent suggéré, nous le verrons, à l'origine du sentiment de présence. De plus, la CAVE permet le déplacement naturel du sujet ; si la salle utilisée est suffisamment grande, le sujet peut simplement marcher, courir et sauter dans l'environnement virtuel, ce qui était impossible jusqu'à récemment avec les casques de réalité virtuelle, pour la simple raison que ces derniers étaient reliés par câbles à un ordinateur. Enfin, la CAVE ne nécessitant pas le port du casque elle permet l'utilisation plus aisée d'outils de recherche expérimentale tels que les systèmes d'analyse de la marche et de la posture (Foreman et al., 2019) ou les différentes techniques d'imagerie cérébrale (Boukhalfi et al., 2015).

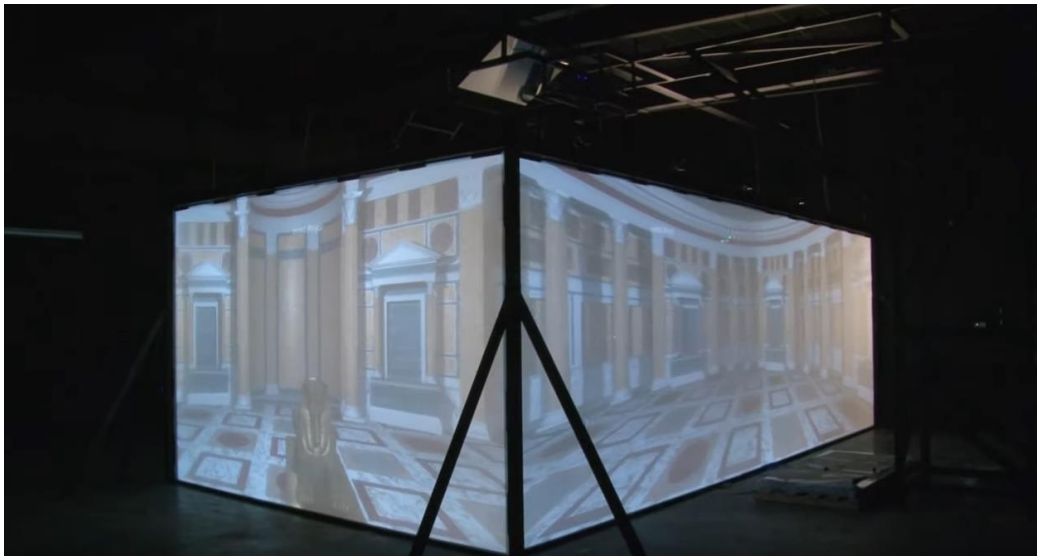


Figure 3. – Vue extérieure de la CAVE du Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle (*CIREVE - Université de Caen Normandie, 2016*).

Les années 2000 sont plutôt pauvres en innovations technologiques dans le domaine de la réalité virtuelle, si l'on excepte le lancement de Google Street View en 2007 qui permet un visionnage 360° degrés des images prises par un véhicule, permettant à chaque utilisateur de leurs services

une certaine forme d'immersion n'importe où dans le monde. Cette immersion sera améliorée quelques années plus tard avec l'incorporation de la 3D. La collecte de fonds lancée par Palmer Lucky, un entrepreneur de 18 ans présentant un prototype de casque de réalité virtuelle, et qui atteint les 2.4 millions de dollars, marque le réel tournant pour la réalité virtuelle au cours des années 2010. Cette campagne, l'intérêt général qu'elle suscite ainsi que les qualités innovantes du prototype pousse Facebook à acheter la compagnie Oculus VR pour 2 milliards de dollars, amplifiant encore plus le phénomène de mode. Dans la lancée, toutes les grandes compagnies se mettent à la recherche, au développement et à la commercialisation de casques de réalité virtuelle : Google avec le Cardboard, Sony avec le Projet Morpheus, Samsung avec le GearVR puis HTC avec le HTC Vive (Fuchs, 2016). A partir de ce moment, des entreprises de réalité virtuelle fleurissent un peu partout dans le monde : non seulement parce que les applications paraissent infinies et que l'industrie se révèle économiquement prometteuse (Global Virtual Reality Industry, 2020), mais aussi car les coûts ont substantiellement baissé et que de plus en plus de contenus sont accessibles gratuitement (Castelvecchi, 2016; Cipresso et al., 2016). En effet, les moteurs de rendus graphiques s'étant largement développés avec les cartes graphiques (suivant plus ou moins timidement la loi de Moore), les plateformes et outils proposent aujourd'hui non seulement des moyens de développement centralisés via des SDK (*Software Development Kit*) ou des API (*Application Programming Interface*) à l'image de OpenVR, SteamVR ou Oculus Unity Integration dans Unity3D, mais également des banques gratuites d'objets 3D, de sons ou même des scripts clés en main. Le développement d'Internet et des communautés d'aide collective à la programmation telle Stack Overflow ont également largement contribué à la démocratisation de l'outil du côté développeur. En 2020, et toujours selon la loi de Moore, les ordinateurs capables de soutenir un affichage de réalité virtuelle sont courants. Aussi, l'utilisation de la combinaison des casques permettant un affichage simple mais peu d'interaction par le téléphone est en passe de disparaître, remplacée par des modules indépendants et sans fil à l'image de l'Oculus Quest. Si l'on s'accorde le droit à la spéculation, il convient également de remarquer que de plus en plus de casques sont équipés d'oculomètres, ce qui permettra dans le futur un apport considérable au niveau non seulement de l'interaction homme-machine, mais aussi du rendu visuel grâce au *fovea rendering*, technique consistant à allouer davantage de ressources computationnelles là où se pose le regard du participant comparativement au reste de la scène virtuelle (Patney et al., 2016). Cependant, et si depuis le lancement de l'Oculus de Lucky les casques se sont largement améliorés (champ de vision, taux de rafraîchissement, pixellisation, qualités graphiques), les mécanismes utilisés sont globalement stables depuis les travaux d'Ivan Sutherland.

2.1.3. Taxonomies

Plusieurs tentatives taxonomiques de la réalité virtuelle et de ses technologies existent, mais rares sont celles à faire consensus comme le fait celle, évoquée précédemment, des réalités mixtes et du continuum de virtualité de P. Milgram & Kishino (1994). En effet, il est compliqué de déterminer sur quels éléments s'appuyer pour classer les outils de réalité virtuelle. Faut-il considérer les capacités immersives pures du matériel ? Faut-il utiliser les technologies utilisées, les éléments immersifs, le sentiment de présence engendré, le contenu de l'environnement virtuel, la fonction de l'environnement virtuel, les moyens d'interaction ou encore le nombre d'utilisateurs potentiels ? Une forme classique de taxonomie de la réalité virtuelle tend à séparer les technologies dites pleinement immersives, incluant généralement le système CAVE, des technologies partiellement immersives, incluant généralement la réalité virtuelle sur écran (Almufareh et al., 2018; Muhanna, 2015). Nous défendons ici qu'il est délicat d'accorder, selon le type de la technologie utilisée, une différence inhérente d'immersion entre ces technologies. Il est nécessaire, pour ce faire, de définir brièvement l'immersion, sur laquelle nous discuterons plus tard : si l'on définit l'immersion comme un ratio entre la quantité et la qualité d'informations issues de l'environnement primaire cachées et la quantité et qualité d'informations issues de l'environnement virtuel révélées, il est alors tout à fait possible qu'une CAVE soit moins immersive qu'un écran stéréoscopique. Il est en effet très commun que les murs-écrans d'une CAVE ne soient pas entièrement fermés, et ce pour des raisons pragmatiques. Si l'attention du participant est portée sur cet écran manquant, alors il sera moins immergé que face à un écran complet, même plus petit : toute une partie de son environnement physique lui sera alors révélé, et toute une partie de son environnement virtuel lui sera caché. De plus, un système CAVE utilisant généralement plusieurs ordinateurs en réseau (technique dite de *clusters*) et toujours plusieurs projecteurs (Manjrekar et al., 2014), il est bien plus sujet aux défauts graphiques, à la latence et aux erreurs de calibration qu'un simple écran avec double entrée stéréoscopique, ce qui constitue autant d'éléments hautement nuisibles à l'immersion. Il serait donc plus pertinent de présenter ces taxonomies sans évoquer l'immersion, et s'il existe vraiment un besoin de différencier les systèmes CAVE et les casques de réalité virtuelle des systèmes d'écrans immersifs, il serait plus judicieux de le faire sur la capacité englobante ou contenante (*surrounding*) définie par Slater et Wilbur (1997), de ces différents formats. Une distinction intéressante rendant compte de cette capacité contenante est par exemple celle de la sensation de regarder vers l'environnement virtuel, versus la sensation d'être dans l'environnement virtuel (Shneiderman, 1997). De la même façon qu'un casque de réalité virtuelle éteint n'a jamais immergé personne, la quantité d'informations virtuelles révélées et la quantité d'informations primaires cachées ne suffisent pas à rendre compte des qualités immersives d'un système.

D'autres taxonomies de la réalité virtuelle, adaptées à des domaines d'applications particuliers existent ; par exemple pour le domaine médical (Almufareh et al., 2018), où sont différenciées les applications de l'outil (assistance chirurgicale, visualisation de données, réhabilitation & thérapie, entraînement & éducation), ou pour le domaine de l'éducation (Motejlek & Alpay, 2019), où sont différenciés l'entraînement, l'enseignement et l'observation.

La comparaison des différents outils et techniques de réalité virtuelle demeure cependant cruciallement utile, que ce soit méthodologiquement ou fondamentalement. Par exemple, il a été rapporté que durant une même tâche de navigation spatiale, les utilisateurs de casques de réalité virtuelle se sont révélés moins performants que les utilisateurs sur ordinateurs classiques (Sousa Santos et al., 2008), mais s'en sont montrés plus satisfaits. Par ailleurs, il a été montré que le système CAVE améliore la qualité de la représentation du corps du sujet par rapport à un casque de réalité virtuelle (Mestre, 2017). De plus, lors d'une étude comparée entre ces deux systèmes (CAVE versus Casques de réalité virtuelle) durant une même tâche anxiogène, il a été montré que les participants du groupe CAVE ont ressenti davantage de présence spatiale mais aussi d'anxiété, ce qui laisse supposer une meilleure immersion (Juan & Pérez, 2009). Cet effet semble relativement stable : dans une autre étude (ordinateurs versus Casques versus CAVE), les participants de la plateforme CAVE ont montré davantage de présence que les autres groupes, et les utilisateurs de casques ont rapporté davantage de cybermalaises, sans différence sur la performance à la tâche (Kwanguk Kim et al., 2012). La comparaison des différents systèmes de réalité virtuelle a fait l'objet et fait toujours l'objet de nombreuses études dans le domaine, bien que l'évolution rapide des technologies en relativisent les résultats (Coomans & Timmermans, 1997; Y. M. Kim et al., 2020; Kjeldskov, 2001; Manjrekar et al., 2014; Swindells et al., 2004).

2.1.4. Applications

Il serait impossible en 2020, au moment où ces lignes sont écrites, de dresser une revue exhaustive des applications actuelles de la réalité virtuelle, et encore moins de discuter de leurs évolutions futures. Même si quelqu'un parvenait, après d'intenses et interminables recherches, à dresser un tableau de toutes les applications actuelles de la réalité virtuelle, l'évolution rapide des technologies et des pratiques rendrait cette revue obsolète dès sa parution, faisant de son auteur un Sisyphe de laboratoire. En effet, la collection Web of Science contient aujourd'hui 40 000 entrées pour *virtual reality*, alors que ce nombre n'était que de 22 200 en 2018 (Cipresso et al., 2018). Aussi, si le but évident de cette partie est d'évoquer les grands domaines des applications de la réalité virtuelle, il s'agit surtout d'en profiter pour présenter les apports possibles de cet outil.

Cette revue partielle des applications actuelles de la réalité virtuelle est bien évidemment choisie arbitrairement par l'auteur, notamment afin d'illustrer les pans d'applications de ce travail doctoral.

2.1.4.1. Archéologie et restitution patrimoniale

L'utilisation de la réalité virtuelle en archéologie est relativement ancienne, dans ce domaine où existe une longue tradition de représentation du contexte, souvent à l'aide de descriptions textuelles longues et détaillées (Reilly, 1990). Dans un article au nom évocatoire de *Towards a virtual archeology* Paul Reilly présente les apports de la réalité virtuelle en archéologie et notamment les capacités de restitution en trois dimensions. Il soulève plusieurs enjeux au cœur de cette archéologie virtuelle. Tout d'abord, les capacités à simuler un site de fouille complet afin d'en présenter les étapes, les techniques et les difficultés. Ensuite, la réalité virtuelle peut permettre d'explorer des modélisations de monument, non seulement afin de mieux les comprendre, mais aussi de continuer à les ouvrir au public et aux chercheurs lorsqu'ils sont inaccessibles (en restauration ou tout simplement disparus). La représentation en trois dimensions, voire quatre dimensions avec le possible ajout de la variable temps dans la modélisation pour rendre compte de l'évolution du patrimoine (Krasniewicz, 2000), est au cœur de l'utilisation de la réalité virtuelle dans ces domaines et fait l'objet de nombreuses discussions (Bonnett, 2003; Krasniewicz, 2000; Staley, 2002). Damien Vurpillot avance par exemple que la restitution en réalité virtuelle permet de rendre compte du *decorum* d'un bâtiment, développant l'idée que chaque monument a un sens et que ce sens ne peut être appréhendé réellement que confronté à son contexte, notamment visuel (Vurpillot, 2016). Allant dans ce sens, Brendan Cassidy et ses collègues avancent que la réalité virtuelle peut permettre aux archéologues non seulement de mieux comprendre l'objet dans son contexte, mais aussi de le faire à distance, *virtually in situ* ce qui serait favorable à la collaboration scientifique (Cassidy et al., 2019). D'autres idées sont énoncées, notamment la capacité lors de l'immersion réalité virtuelle à agir indépendamment des lois de la physique ; il est par exemple possible de voler au-dessus d'un site pour s'en faire une meilleure représentation (Szymczyk et al., 2016), ou encore d'interagir avec des artefacts disparus, ce qui peut apporter non seulement une meilleure représentation de l'objet mais aussi mieux éclairer sur ses fonctions (Di Franco et al., 2015). Il est également souvent avancé que la visualisation en réalité virtuelle permet une meilleure appréciation des proportions visuelles (Verwulgen et al., 2020). Ces différents arguments sont retrouvés également dans les applications de la réalité virtuelle en architecture, construction et urbanisme (H. F. Moore & Gheisari, 2019; Noghabaei et al., 2020; Portman et al., 2015; Whyte, 2003). La problématique de la représentation dans ces domaines ne saurait être mieux illustrée que par l'histoire du Plan de Rome. Le Plan de Rome est une maquette en plâtre d'environ

70 m² qui représente les 3/5 de la ville de Rome au début du IV^{ème} siècle après J.-C. Son créateur, Paul Bigot, Grand Prix de Rome en 1900, a consacré la grande majorité de sa vie à cette reconstitution de la ville de Rome (Bigot, 1942; Fleury, 2014). Cette représentation peut être considérée comme un ancêtre de la reconstitution virtuelle, puisqu'elle permet elle aussi une visualisation en trois dimensions. Cependant, son support matériel rend compliquée l'évolution de la maquette pour la veille scientifique et surtout ne permet qu'une échelle de 1/400 et non de 1/1, ce qui rend, de fait, difficile les possibilités d'interaction. Aussi, c'est à partir de ce Plan de Rome en plâtre qu'est né à l'Université de Caen le projet de reconstitution de la ville de la Rome Antique au IV^{ème} siècle sous la direction de Philippe Fleury (Fleury & Desbordes, 2008; Fleury & Madeleine, 2007, 2011, 2012). Cette reconstitution virtuelle interactive n'est pas seulement un moyen de recherche, mais aussi un outil de transmission du savoir lors de cycles de conférences nommés Les Nocturnes du Plan de Rome. Ces séances virtuelles immergent le public dans des visites virtuelles guidées de la ville (Fleury et al., 2016) comme représentées en Figure 4. Cet exemple purement arbitraire n'en est qu'un parmi d'autres tant les résultats, techniques et procédures des différentes applications de la réalité virtuelle dans ces domaines sont nombreux (Barreau et al., 2014; Borba et al., 2016; Borba, Montes, Lopes, et al., 2017; Borba, Montes, Almeida, et al., 2017; Dhanda et al., 2019; Fritsch & Klein, 2018; Martire, 2014).



Figure 4. – Visite virtuelle guidée lors d'une Nocturne du Plan de Rome (*L'amour à Rome - Les Nocturnes du Plan de Rome 2019*).

2.1.4.2. Arts & divertissements

Avant de se voir ouvrir les portes du Festival de Cannes (Labbe, 2017) ou d'être le format natif de jeux vidéo cultes comme la franchise Half-Life (Acovino, 2020), la réalité virtuelle dans le secteur des arts et du divertissement est longtemps restée de niche. Dans son ouvrage traitant de la place des arts en réalité virtuelle, Gianluca (2010) considère David Em comme le premier artiste à créer des mondes virtuels dans lequel il est possible de naviguer, accompagné de Jeffrey Shaw, Char Davies et Maurice Benayoun comme pionniers du domaine. La culture des arts digitaux y est décrite comme née de la fusion des arts, de la technologie et de la science. La réalité virtuelle est effectivement reconnue depuis longtemps par ses acteurs comme « a new medium, a new entertainment, a new and very powerful type of art » (Bates, 1992), et il n'est nul besoin d'être un grand artiste pour comprendre pourquoi : il devient possible de créer des expériences impossibles autrement, de jouer avec la perception humaine ou avec le corps même du participant, par exemple en modulant une sortie visuelle sur des ondes cérébrales ou sur le rythme cardiaque de celui-ci (Horie et al., 2018). La réalité virtuelle peut proposer des visualisations nouvelles et synesthésiques de la musique, inventer des instruments ou créer des concerts virtuels (Serafin et al., 2016). Ses applications artistiques sont potentiellement illimitées, et bien qu'encore peu exploitées elles sont inhérentes à l'outil tout comme l'était le cinéma vis-à-vis de la capture visuelle. La toute première des 52 définitions de la réalité virtuelle donnée par Jaron Lanier (2017) dans son livre *Dawn Of the New Everything : a Journey Through Virtual Reality* présente d'ailleurs cette technologie comme un art en soi : « a twenty-first-century art form that will weave together the three great twentieth-century arts: cinema, jazz, programming ».

Du côté du jeu vidéo – et s'il est possible de séparer les jeux vidéo des arts ("Video Games as an Art Form," 2020) – les premières applications grand public sont apparues, comme énoncées précédemment, durant les années 1990 avec le Virtual Boy de Nintendo (Edwards, 2015) ou le Sega VR jamais commercialisé (Wiltz, 2019). Des casques récents comme le Playstation VR ou l'Oculus Quest ont pour principale vocation le divertissement, majoritairement ludique. Leurs systèmes embarqués indépendants comparables à des consoles de salon permettent à l'utilisateur en effet très peu de contrôle sur la machine, encore moins de facilités de développement. Le marché du jeu vidéo en réalité virtuelle est encore extrêmement petit comparé à l'immense marché des jeux pour ordinateurs. Le plus grand succès commercial à ce jour, BeatSaber, un jeu d'arcade et de rythme s'est vendu à plus de 1 million de copies en 2019 après moins d'un an d'existence (« How Beat Saber Beat the Odds », 2020). Un effet collatéral de l'émergence de l'outil est que, du fait de prix matériels encore élevés, les salles d'arcade disparues (leur nombre a été divisé par deux

en Angleterre entre 1980 et 2011) ont refait surface, proposant une offre nouvelle en réalité virtuelle (Pattenden, 2018).

Une autre offre de divertissement amenée ou altérée par la réalité virtuelle est celle des vidéos à 360°, désormais nativement lues par la plupart des lecteurs vidéo et réseaux sociaux, qui ont amené des changements certains dans la conception audiovisuelle (*360 Video and Virtual Reality*, 2020). Si l'interaction au cœur des définitions de la réalité virtuelle est relativement faible lors de la lecture d'une vidéo à 360°, il est possible d'argumenter que l'orientation de la tête et du regard ayant un retour sur la perception constitue une forme d'interaction. Le marché des vidéos à 360° pourrait être amené à se développer, considérant le fait que la consommation de vidéo représentait en 2019 plus de 60% du volume du trafic sur Internet (Cullen, 2019). Cette application de la réalité virtuelle doit être mise en relation avec un autre marché dominant, celui de la pornographie. Comme de nombreuses autres avancées techniques telles que le caméscope et le magnétoscope, ou même semblerait-il le stéréoscope décrit précédemment (Coopersmith, 1998; V. R. Schwartz & Przyblyski, 2004), la pornographie stimule l'innovation et la consommation de réalité virtuelle (Green, 2018; Sutton, 2019). La pornographie est par ailleurs un objet d'étude courant des expérimentations en réalité virtuelle (Fontanesi & Renaud, 2014; Laframboise et al., 2006; Renaud et al., 2002, 2013).

2.1.4.3. Éducation & entraînement

Une des 52 définitions de la réalité virtuelle de Jaron Lanier précédemment mentionnées résume pertinemment l'apport de l'outil pour l'éducation : la réalité virtuelle est une « instrumentation to make your world change into a place where it is easier to learn » (Lanier, 2017). L'éducation peut être décrite comme le processus visant à faciliter l'apprentissage, l'acquisition de connaissances, de compétences ou de valeurs positives (Kamińska et al., 2019). Les applications de la technologie en éducation constituent probablement la clé de voûte du développement de la réalité virtuelle. Il convient notamment de rappeler la longue histoire des simulateurs de vol qui ont largement contribué au développement global de l'outil (Page, 2000). Depuis, de nombreux domaines se sont emparés de ce dernier à des buts éducatifs : santé, ingénierie, sciences, industrie... (Kamińska et al., 2019; Kavanagh et al., 2017). La littérature scientifique semble montrer un effet constant du transfert de l'apprentissage depuis le virtuel vers le réel, question au cœur des problématiques dans le domaine (Billing, 2007). En effet, le développement des compétences motrices ou cognitives en réalité virtuelle est généralement associé à une amélioration dans la réalité physique (Levac et al., 2019), phénomène dénommé transfert de connaissances ou transfert de

compétences. Ce transfert de compétences est au centre de réflexions fructueuses entre les différentes théories de l'apprentissage notamment comportementales, cognitivistes et constructivistes (Bossard et al., 2008). Il existe de nombreuses raisons pour lesquelles les auteurs du domaine sont aussi enthousiastes et prolifiques concernant cet outil. Premièrement, les environnements virtuels permettent des expériences non symboliques qui ne peuvent être obtenues dans les formats classiques de l'éducation formelle, et qui s'intègrent pleinement dans la théorie de l'apprentissage constructiviste, théorie souvent suggérée comme cadre privilégié de l'apprentissage en réalité virtuelle (C. J. Chen, 2009; Fosnot, 2013; Leung et al., 2018; Winn, 1993). Dans cette approche constructiviste, la connaissance est considérée comme une entité construite par chaque individu à travers le processus d'apprentissage : la connaissance n'est jamais réellement partagée et doit perpétuellement être reconstruite par et pour chaque apprenant (Bossard et al., 2008). C'est dans ce contexte que la réalité virtuelle brille. En effet, la réalité virtuelle motive les élèves, encourage la participation active, retient l'attention et améliore l'attitude des élèves vis-à-vis de l'apprentissage (Lazar, 2018; Pantelidis, 2009). De plus, elle peut être utilisée pour construire l'apprentissage quand l'entraînement réel serait dangereux, coûteux, peu pratique ou impossible (Kavanagh et al., 2017; Radianti et al., 2020). Par ailleurs, les environnements virtuels peuvent être personnalisés pour s'adapter aux modalités d'apprentissages et styles cognitifs individuels : ils rendent possibles de nouvelles formes de représentations plus aptes à utiliser les forces des modalités visuelles de certains individus dans leur construction de l'apprentissage, indépendamment de leurs capacités abstractives (F. Mantovani & Castelnuovo, 2003; Pantelidis, 2009). Toutes ces discussions ont donné lieu au terme de *Virtual Reality Learning Environments* plus connu sous l'acronyme *VRLE*, et font de la réalité virtuelle un outil plus que prometteur dans le domaine éducatif (Chavez & Bayona, 2018; H.-M. Huang et al., 2010; G. Q. Huang et al., 2014; H.-M. Huang & Liaw, 2018; Jensen & Konradsen, 2018; Mikropoulos & Natsis, 2011; Suh & Prophet, 2018; Youngblut, 1998). Les possibilités d'applications sont, encore une fois, limitées uniquement par l'imagination des acteurs et les compétences de calcul des ordinateurs. De la visualisation immersive de contenu pour l'apprentissage historique comme le fait le projet Plan de Rome (Fleury & Madeleine, 2011), jusqu'à l'évaluation métacognitive en représentant une salle de classe virtuelle pour mieux en comprendre les mécanismes (Coleman et al., 2019), en passant par l'entraînement de situation médicale d'urgence (De Leo et al., 2014; Izard et al., 2018) ou encore l'entraînement militaire (Pallavicini et al., 2016), la réalité virtuelle s'est imposée comme un outil éducatif innovant et prometteur.

2.1.4.4. Journalisme et sensibilisation

La réalité virtuelle est souvent évoquée comme une potentielle nouvelle forme de journalisme dit journalisme immersif. Le journalisme immersif est défini comme « the production of news to support participants gaining first-person experiences of the events or situations in the new stories » (de la Pena et al., 2010). L'idée est généralement de permettre au participant d'entrer dans l'histoire racontée par le journaliste, lui permettant, non sans rappeler les théories constructivistes, d'associer au contenu abstrait des informations sensorielles et émotionnelles. Le New York Times, un des premiers journaux à adopter la technologie, a par exemple envoyé plus d'un million de Google Cardboards à ses abonnés (Sirkkunen et al., 2016) afin de leur proposer *The Displaced*, un reportage d'une dizaine de minutes racontant les histoires de trois enfants obligés de quitter leurs foyers à cause des crises au Liban, au Sud Soudan et en Ukraine. La réalité virtuelle semble en effet prometteuse pour réinventer le journalisme et les reportages (Kool, 2016; S. Jones, 2017; Laws, 2020; Sirkkunen et al., 2016). Une des fonctions régulièrement évoquées est la capacité de cet outil à produire de l'empathie (Roswell et al., 2020), à se mettre à la place de l'autre, comme le démontre la réalisation de *Becoming Homeless : A Human Experience*, une production du Virtual Human Interaction Lab de l'Université de Standford (2017). Cette courte expérience interactive propose de placer le participant dans la vie d'un individu qui n'a plus les moyens financiers de s'assurer un logement. Cette expérience est, selon les auteurs, un moyen de révéler l'ampleur de l'erreur fondamentale d'attribution qui consiste à blâmer la nature de l'individu lorsque les autres commettent des erreurs, mais à blâmer les circonstances et le contexte lorsque l'on commet soi-même des erreurs. Un autre exemple est le projet est de placer le participant dans la peau d'un enfant autiste afin de proposer une meilleure compréhension de l'expérience quotidienne des individus du spectre autistique (Musser, 2018). La sensibilisation par la réalité des troubles du spectre autistique est d'ailleurs corroborée empiriquement par Hadjipanayi & Michael-Grigoriou (2020).

2.1.4.5. Marketing et industrie

De nombreux secteurs de l'industrie se sont emparés des techniques immersives, à commencer par les domaines gigantesques de la construction et de l'automobile dont les produits sont systématiquement prototypés en réalité virtuelle depuis plusieurs années (Purschke et al., 1998; Whyte, 2003; Ziarati et al., 2009). Aussi, il n'est plus rare de voir des visites virtuelles proposées dans le secteur de l'immobilier (Brenner, 2017; Yu, 2011), bien que l'application principale de ces technologies dans le monde de l'industrie demeure l'entraînement et la formation des personnes. Une utilisation largement répandue de la réalité virtuelle dans le monde industriel et commercial

est celle des supermarchés virtuels (Nederkoorn et al., 2009), utilisation qui permet aux commanditaires de mieux connaître les comportements des clients afin de maximiser les profits réalisés. Cette pratique est largement intégrée dans le *neuromarketing*, technique qui consiste à utiliser les connaissances des neurosciences dans le domaine de la vente (C. Morin, 2011; Murphy et al., 2008).

2.1.4.6. Réseaux sociaux et télétravail

Une application de la réalité virtuelle largement susceptible de se développer est son utilisation comme moyen de sociabilité, voire comme potentiel remplaçant ou du moins prolongation des réseaux sociaux (à l'image de Facebook achetant Oculus). Des applications comme VRChat font partie du paysage quotidien de la réalité virtuelle ; il s'agit d'applications sans but défini si ce n'est celui de rencontrer d'autres personnes elles aussi immergées dans un monde virtuel. Facebook travaille de son côté au développement de la réalité virtuelle comme réseau social, comme un endroit où l'on peut retrouver ses amis, par exemple dans un bar virtuel. Cette possibilité d'être avec ses amis à distance peut également se décliner pour des applications professionnelles, notamment pour le télétravail ou les entretiens et réunions à longue distance.

2.1.4.7. Sciences des données & visualisation

A l'instar de la visualisation archéologique ou patrimoniale, certaines données scientifiques ou technologiques sont plus facilement appréhendables en trois ou quatre dimensions interactives. Le courant des *data sciences* s'intéresse particulièrement à ce format, puisque la visualisation – souvent abstraite – des données est au cœur des problématiques (on parle parfois pour citer ces professions d'architecte des données). La réalité virtuelle pourrait dans ces domaines non seulement faciliter cette représentation, mais aussi permettre une collaboration dans un même espace (Donalek et al., 2014). Cette visualisation peut être déclinée à différents types de données : le traçage de neurones (Usher et al., 2017), la sismologie (Kaiser et al., 2005), les courants marins (Bernhardt et al., 2020), la physique avec l'étude du plasma (Ohno et al., 2006) de l'espace (Fertrand et al., 2016) ou de l'atome (Disz et al., 1995)

2.1.4.8. Sciences expérimentales

La réalité virtuelle est une véritable mine d'or pour les scientifiques, notamment ceux des sciences expérimentales, et ce n'est pas surprenant que ces derniers fassent partie des premiers et principaux utilisateurs de celle-ci. Pour commencer, l'émergence et le développement de l'outil nécessite un travail scientifique et technique considérable, d'autant plus qu'il requiert une collaboration interdisciplinaire probablement inédite (Sanchez-Vives & Slater, 2005). Au risque d'en faire une

habitude, une autre des définitions de la réalité virtuelle de Lanier est d'ailleurs « virtual reality is the most centrally situated discipline » (Lanier, 2017). En effet, son développement requiert des connaissances et techniques issues des sciences informatiques et mathématiques, électroniques et mécaniques, optiques, des neurosciences et des sciences des comportements, des sciences cognitives et des sciences du mouvement. Il convient de préciser que dans chacun de ces grands domaines, plusieurs sous-domaines sont concernés, par exemple: architecture, réseau, rendu graphique, développement logiciel et matériel, interaction homme-machine et expérience utilisateur pour l'informatique; perception, intégration multisensorielle, modèle interne, boucles sensori-motrices, fonctions exécutives, contrôle moteur, émotions, facteurs humains et métacognition pour les sciences cognitives.

2.1.4.7.1. La dimension écologique

Bien que la plupart des scientifiques utilisant la réalité virtuelle travaillent d'une façon ou d'une autre à son développement, il existe de nombreux domaines de recherche, notamment dans l'investigation du comportement humain, où la réalité virtuelle est considérée comme un moyen et non une fin en soi. La réalité virtuelle se dessine dans ces domaines comme un nouveau et puissant paradigme des sciences expérimentales dont l'innovation réside dans la validité écologique (Parsons, 2015). En effet, il existe depuis longtemps en sciences (distinction issue de la biologie) une division entre les méthodes *in vivo* (ou *in situ*) et les méthodes *in vitro*. Les méthodes *in vivo* consistent à observer l'objet d'étude dans son milieu naturel, sans interagir avec ce dernier; le but étant d'analyser un comportement naturel, ou du moins inséré dans le milieu écologique. Ces auteurs considèrent que les comportements observés en laboratoire sont trop artificiels et trop peu intégrés pour rendre compte de leur complexité (Parsons, 2015). Au contraire, leurs opposants rétorquent que les méthodes *in vivo* manquent de validité et sont parasitées par tout un ensemble de variables entremêlées qu'il est impossible de neutraliser autrement qu'en laboratoire, là où le contrôle expérimental prévaut. La problématique de la dimension écologique est au cœur de larges tensions au sein des sciences comportementales, et c'est au regard de ces dissensions que la réalité virtuelle apparaît comme un paradigme particulièrement intéressant. En effet, cet outil permet de réaliser un rapprochement entre les deux méthodes d'investigation du comportement humain : la réalité virtuelle combine « the best of both worlds » (Minderer et al., 2016). Elle permet aux scientifiques de créer des environnements virtuels dans lesquels chaque stimulus peut être personnalisé, contrôlé et intégré dans une tâche écologique, tout en récoltant des données de façon expérimentalement rigoureuse (Coleman et al., 2019; Oliveira et al., 2017). Cette jonction proposée par la réalité virtuelle entre contrôle expérimental et validité écologique

est au cœur de son utilisation en sciences comportementales, cognitives et autres neurosciences, d'autant plus que la réalité virtuelle permet l'utilisation de nombreuses techniques d'imagerie (spectroscopie proche infra-rouge, électroencéphalogramme, électromyogramme, imagerie par résonance magnétique...) difficilement réalisables dans des scénarios de la vie quotidienne (Boukhalfi et al., 2015; Carrieri et al., 2016; Clemente et al., 2013; Farmaki et al., 2019; Seraglia et al., 2011). Enfin, la réalité virtuelle a deux intérêts au regard de cette dimension écologique. Le premier, évident et décrit précédemment est de permettre de réaliser des expérimentations les plus écologiques et naturelles de façon contrôlée, par exemple l'étude des comportements piétons (H. C. Chung et al., 2020). La deuxième est de jouer sur le caractère naturel pour en modifier certains détails physiquement irréalisables, par exemple le fait de voler virtuellement pour explorer l'induction de rêves (Picard-Deland et al., 2020).

2.1.4.7.2. La cognition spatiale

L'exemple de la cognition spatiale illustre parfaitement les problématiques entre évaluation écologique et contrôle expérimental. En effet, les habiletés de cognition spatiale en laboratoire se révèle particulièrement complexes à évaluer. Les tests papier-crayon ne comportant aucune validité écologique, ils sont généralement considérés comme évaluant davantage les habiletés visuo-spatiales pures et ne prédisant que faiblement les performance spatiales réelles d'un individu (Allahyar & Hunt, 2003). L'utilisation de tests *in vivo*, où le participant est emmené puis évalué dans une ville réelle est également problématique (Cohen, 2013) : non seulement ces procédures sont généralement compliquées et parfois dangereuses, mais surtout elles manquent du contrôle expérimental nécessaire à une évaluation rigoureuse, que ce soit en recherche fondamentale ou en diagnostic. De fait, et alors que des troubles de la cognition spatiale sont souvent révélateurs de déficits exécutifs, de lésions cérébrales ou de dégénérescences, l'évaluation de cette dernière est bien souvent manquante lors de diagnostics neuropsychologiques (Cogné et al., 2017). La réalité virtuelle se distingue alors comme un outil de prédilection, que ce soit en recherche fondamentale ou en diagnostic clinique (Allahyar & Hunt, 2003). Il devient en effet possible de créer des villes ou des labyrinthes virtuels comportant une dimension écologique respectable, tout en contrôlant chacune des entrées et sorties de l'interaction homme-machine. L'utilisation de la réalité virtuelle pour l'étude de la cognition spatiale est déjà relativement bien développée, si bien que de nombreuses études de faisabilité et de validité des mesures existent, aussi bien pour la recherche fondamentale que pour la détection de déficits (Allison et al., 2016; Byagowi & Mousavi, 2012; Cushman et al., 2008; Diersch & Wolbers, 2019; Ijaz et al., 2019; O. Kim et al., 2019;

Zhou et al., 2020; Kyungwan Kim & Bock, 2020). La Figure 5 illustre une étude de cognition spatiale dans l'espace destinée à explorer les effets de la microgravité sur l'orientation, la perception de la verticale et de l'horizontale et la perception des distances (Harris et al., 2017).

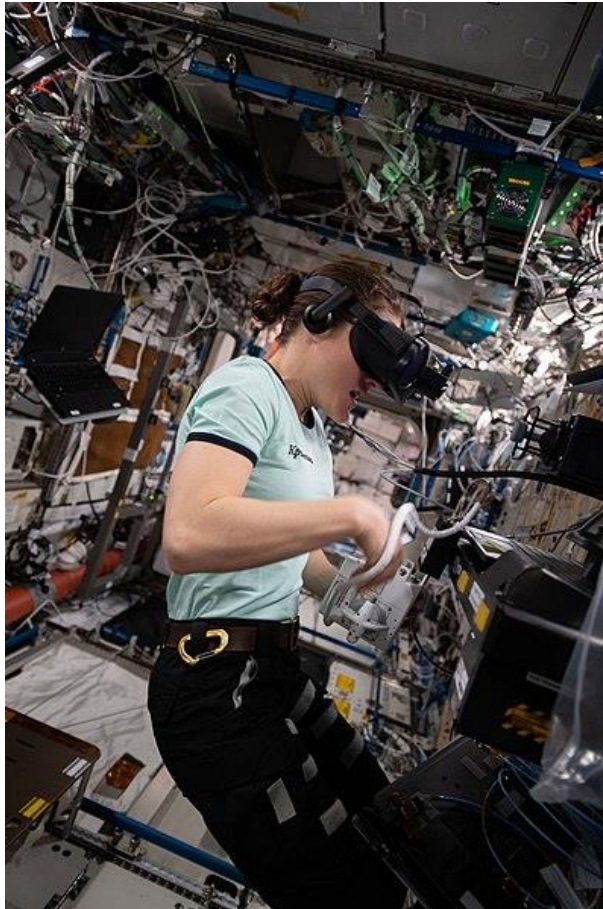


Figure 5. – Photographie d'une astronaute de la NASA de l'expédition 59 portant un casque de réalité virtuelle pour l'étude Vection de Harris et al. (2017).

2.1.4.7.3. Les mémoires

Au-delà des processus propres à la cognition spatiale, la réalité virtuelle est un outil prometteur pour l'investigation de la mémoire (ou plutôt des mémoires), et notamment de la mémoire épisodique, la mémoire des événements, ou prospective, la mémoire des intentions (Einstein & McDaniel, 2005; Schacter & Addis, 2007). La mémoire épisodique correspondant à l'encodage et au rappel d'une situation, d'un événement, celle-ci est particulièrement sensible à la dimension écologique et son évaluation en laboratoire très complexe. La réalité virtuelle permet, à l'instar des

évaluations de cognition spatiale, d'évaluer précisément les capacités mnésiques des participants, et ce à des fins de recherche ou d'évaluation clinique, dans un environnement méthodologiquement contrôlé et écologiquement fiable (Abichou et al., 2017; Lecouvey et al., 2019; Plancher et al., 2010, 2012, 2013, 2008). La cognition spatiale et la mémoire épisodique sont d'ailleurs souvent évaluées conjointement car elles partagent de nombreux processus, notamment leur dépendance à des informations issues de la conjonction entre dimensions spatiales et temporelles ainsi que des substrats neurologiques proches. Si la mémoire épisodique est au cœur des évaluations écologiques de la réalité virtuelle, cette technologie bénéficie à d'autres formes de mémoire, par exemple la mémoire de travail (Fanuel et al., 2020) et les ressources attentionnelles (Girardeau et al., 2020), notamment leur articulation avec la mémoire épisodique (Blondé et al., 2020; Plancher et al., 2018), ou encore avec le maintien postural grâce aux protocoles de double-tâche (Belghali et al., 2017; Killane et al., 2015; Singh et al., 2020).

2.1.4.7.4. Le contrôle moteur

Les domaines de la cognition spatiale et de la mémoire épisodique, bien qu'extrêmement évocateurs des potentialités de la technologie en sciences expérimentales, sont loin d'en être les seuls. La réalité virtuelle est par exemple un outil particulièrement pertinent pour l'étude du comportement moteur et en particulier de la sensorimotricité. En effet, le contrôle moteur étant particulièrement dépendant des entrées sensorielles du sujet, la question de la validité écologique de l'évaluation sur tapis roulant ou plateforme de force classique se pose. Les environnements virtuels permettent non seulement de restituer cette dimension écologique lors de l'analyse, mais aussi de placer le sujet face à des stimuli conflictuels, par exemple des incongruences sensorielles comme un flux visuel inversé afin d'en évaluer l'impact sur la performance motrice et ainsi mieux comprendre leurs interactions. Ces paradigmes peuvent être déclinés pour la recherche fondamentale (Killane et al., 2015; Nunez et al., 2010; Sloom et al., 2014; Kastavelis et al., 2010b, 2010a) aussi bien que pour le diagnostic ou la réhabilitation (Belghali et al., 2017; Biffi et al., 2015; Canning et al., 2020; Mirelman et al., 2011; Sloom et al., 2015).

2.1.4.7.5. Les interactions sociales

Un autre domaine des sciences expérimentales dans lequel la réalité virtuelle brille est celui de la psychologie et des neurosciences sociales. Elle permet en effet l'activation cérébrale dans des scénarios sociaux écologiques, par exemple dans le métropolitain, dans la rue ou encore dans un magasin, souvent à l'aide d'agents humains virtuels (Bohil et al., 2011; Morina et al., 2014). Différents processus d'interactions sociales peuvent alors être analysés de façon écologique et con-

trôlée : analyse des informations sociales comme les jeux de regards, des distances interpersonnelles, des postures et autres comportements non verbaux d'attraction et d'évitement, etc. En effet, et bien plus que des comédiens, les agents virtuels permettent de répéter un comportement identique plusieurs fois à plusieurs participants afin de réduire les biais expérimentaux possibles. Cette technologie permet également des évaluations plus précises des comportements : par exemple dans l'étude du regard, il est possible de programmer les agents virtuels pour qu'ils détournent la tête après un temps extrêmement précis de confrontation visuelle, ce qui n'est pas aussi facilement réalisable dans la réalité physique. De plus, des scénarios à plusieurs agents virtuels sont facilement réalisables, alors que de telles expérimentations dans la vie quotidienne deviennent rapidement coûteuses et encombrantes. La réalité virtuelle est également utilisée dans ce domaine pour réaliser des études considérées comme non éthiques, par exemple la reproduction des études de Milgram sur l'autorité (Cheetham et al., 2009; S. Milgram, 1963; Slater et al., 2006). Pour une revue détaillée des applications de la réalité virtuelle en neurosciences sociales et dans l'analyse des interactions sociales au sens large, nous renvoyons à la revue de Parsons et al. (2017) ou celle de Pan & Hamilton (2018).

2.1.4.7.6. L'éthologie

L'éthologie, l'étude du comportement animal, présente de nombreuses possibilités d'application de la réalité virtuelle. Tout comme pour l'étude du comportement humain (il existe par ailleurs une éthologie humaine), les environnements virtuels destinés aux animaux permettent une étude contrôlée de leurs comportements, que ce soit dans le domaine de la vision, de la cognition, du contrôle sensorimoteur ou même de la navigation libre (Stowers et al., 2017). Ces environnements virtuels sont utilisés chez les insectes (mouches, abeilles, fourmis), les lézards, les oiseaux, les poissons, mais aussi chez les grands primates (Naik et al., 2020). La réalité virtuelle permet par exemple d'étudier le comportement d'un animal lorsqu'il est confronté à un semblable virtuel dont le comportement aura été programmé à l'avance (Witte et al., 2017). La principale limite à ces environnements concerne les difficultés à reproduire une immersion sensorielle satisfaisante pour des systèmes nerveux largement différents, non seulement de l'homme, mais aussi entre différentes espèces. Utiliser par exemple un environnement virtuel pour étudier un comportement canin en laboratoire de façon écologique nécessiterait des stimulations olfactives et auditives de grande qualité pour rendre compte réellement de la sensorialité de l'animal (Naik et al., 2020).

2.1.4.9. Sciences médicales et paramédicales

Enfin, il serait vain de dresser une revue des applications de la réalité virtuelle, même succincte, sans évoquer les nombreuses potentialités de celle-ci dans les différents secteurs de la santé,

bien que ceux-ci partagent de nombreux liens avec les sciences expérimentales. Certaines de ces potentialités ont déjà été évoquées, notamment l'utilisation d'environnements virtuels pour l'entraînement des soignants ou la simulation de situations complexes comme les chirurgies ou le conflit militaire (Alaraj et al., 2011; De Leo et al., 2014; Gurusamy et al., 2009; F. Mantovani et al., 2003; Walsh et al., 2012), ainsi que la possibilité d'apporter la dimension écologique en laboratoire pour affiner les évaluations et donc les diagnostics (Coleman et al., 2019; Dawson & Marcotte, 2017; Jansari et al., 2014; Tarnanas et al., 2013), que ce soit après des traumatismes crâniens (Besnard et al., 2016), un déclin cognitif normal dû à l'âge (Banville et al., 2017; Nolin et al., 2013; Verhulst et al., 2017) ou toute autre forme de performance.

2.1.4.7.1. Rééducation

Partageant de nombreux mécanismes avec les applications d'entraînement, la réalité virtuelle est largement utilisée à des buts de rééducation et de réhabilitation, cognitive et motrice, par exemple suite à des accidents cardiovasculaires (Laver et al., 2015, 2017; Maggio et al., 2019; Tieri et al., 2018; O'Neil et al., 2018; Ghai et al., 2020). En effet, les environnements virtuels couplés à des mécanismes de jeu sont souvent suggérés comme permettant une plus grande acceptation de la thérapie et un plus grand engagement. Les résultats des revues du domaine sont particulièrement concluants, augmentant effectivement la motivation des participants et la durée acceptée des sessions, provoquant une meilleure réponse au traitement et une diminution de l'hospitalisation (Maggio et al., 2019). Un exemple possible d'application de la réalité virtuelle pour la rééducation est le projet Starwalker, réalisé en collaboration entre le Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle de l'Université de Caen Normandie et le Centre d'Etude et de Traitement de la douleur du Centre Hospitalier Universitaire de Caen. Starwalker est un jeu en réalité virtuelle destiné à une population d'enfants kinésiophobiques, pathologie généralement définie comme « une peur excessive, irrationnelle et débilitante du mouvement et de l'activité physique résultant d'un sentiment de vulnérabilité à une blessure douloureuse ou à une nouvelle douloureuse » (Vlaeyen & Crombez, 2009). Ce phénomène, qui est au cœur des processus de chronicisation de la douleur, engendre une anxiété importante ainsi que des comportements d'évitement qui à terme peuvent être responsables de la persistance des problèmes douloureux (Conradi & Masselin-Dubois, 2019). L'intérêt de la réalité virtuelle est ici non seulement de permettre une plus grande acceptation de la rééducation (parfois douloureuse) auprès des enfants, mais aussi de jouer sur le sentiment d'incarnation de l'avatar ainsi sur que sur la distraction de la douleur, afin que le participant, à travers le sentiment de présence dans l'environnement virtuel, oublie sa peur du mouvement. Plus pragmatiquement, Starwalker est un jeu d'adresse où les participants contrôlent un avatar virtuel

avec leurs pieds à l'aide du 3DRudder. Ils sont immergés en réalité virtuelle et doivent attraper ou éviter des objets qui défilent vers eux. Le jeu est actuellement en version alpha (Maneuvrier, 2020).

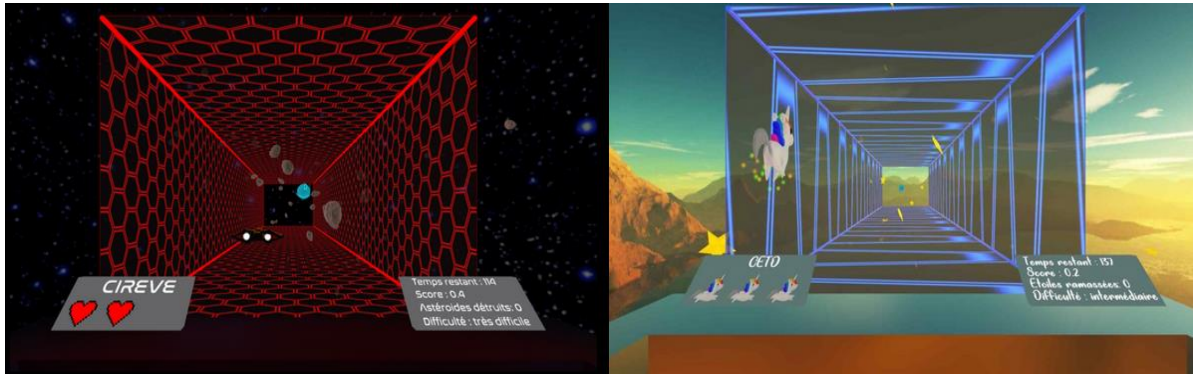


Figure 6. – Vue première personne du jeu en réalité virtuelle Starwalker (deux possibilités d'esthétique, gauche et droite, au choix du patient).

2.1.4.7.2. Traitement de la douleur

La réalité virtuelle est également très prometteuse dans le traitement de la douleur, qu'elle soit chronique ou aiguë (Chen et al., 2017). L'origine de cette utilisation peut être comparée à celle de l'hypnose (Patterson et al., 2006,2010; Rousseaux et al., 2020) et remonte aux travaux de Hoffman sur le traitement des grands brûlés. En effet, le traitement, et notamment le changement des pansements des victimes du feu est particulièrement douloureux. Pour soulager ces individus de leur douleur et permettre des opérations plus apaisées, Hoffman et ses collègues ont créé un monde virtuel de glace qui propose aux participants des tâches simples comme lancer des boules de neige sur des bonhommes de neige. Les résultats expérimentaux cliniques de ces différentes études ont montré des résultats similaires voire supérieurs au traitement médicamenteux (Hoffman et al., 2000; Hoffman, Patterson, et al., 2001, 2004; Hoffman et al., 2008, 2011), et ont ouvert la porte à l'utilisation de la réalité virtuelle dans le traitement non médicamenteux de la douleur. Ces traitements analgésiques, qui ne sont pas sans rappeler ceux de l'hypnose (D. R. Patterson et al., 2006), se sont déclinés pour différents types de douleurs chez différentes populations (K. B. Chen et al., 2017; Gold et al., 2006; Hoffman, Garcia-Palacios, et al., 2001; Won et al., 2017), et ses mécanismes neurobiologiques ont été étudiés (Gold et al., 2007). L'effet analgésique de la réalité virtuelle, bien qu'encore largement incompris, pourrait être lié au sentiment de présence (Gutierrez-Maldonado et al., 2010; Hoffman, Sharar, et al., 2004; Rus-Calafell et al., 2013). Même si des zones d'ombre persistent, les nombreux résultats et discussions autour de la réalité virtuelle analgésique en font un outil prometteur dans le traitement de la douleur (Glennon et al., 2018;

Indovina et al., 2018; T. Jones et al., 2016; A. Li et al., 2011; Malloy & Milling, 2010; Mahrer & Gold, 2009; Pourmand et al., 2018; Won et al., 2017).

2.1.4.7.3. Santé mentale

Un dernier domaine du secteur médical qu'il convient de détailler est celui de la santé mentale, probablement un des plus connus, des plus développés et des plus utilisés. La réalité virtuelle en santé mentale s'est développée en association avec les thérapies cognitivo-comportementales qui considèrent toutes les pathologies mentales comme les conséquences d'apprentissages non pertinents pouvant être désappris (Scozzari & Gamberini, 2011). Les environnements immersifs font partie de l'arsenal technique des thérapeutes. Et pour cause, la réalité virtuelle permet de contrôler avec précision – et validité écologique – les stimuli que l'on veut présenter au participant. Les thérapies cognitivo-comportementales jouant autour des associations stimulus-réponse, et donc de l'exposition aux stimuli, l'outil se révèle particulièrement efficace. Le cas d'école est celui du traitement des phobies et du syndrome post-traumatique dont les résultats sont plus que concluants (Botella et al., 2017; Maples-Keller et al., 2017). Un individu souffrant de sa peur des araignées peut ainsi se faire proposer une thérapie cognitivo-comportementale en réalité virtuelle. Dans ce cas, le participant serait plongé dans un monde virtuel, intégré et écologique. Puis, loin de lui, une petite araignée virtuelle apparaîtrait. Le but des stratégies d'exposition étant de rompre l'association entre le stimulus (l'araignée) et la réponse (la peur), le participant sera invité à regarder l'animal le plus longtemps possible. Il pourra alors le voir se déplacer. Puis, le psychologue pourra décider d'augmenter l'exposition, par exemple en augmentant la taille de l'araignée, le nombre d'araignées ou encore la distance entre l'animal et le participant, jusqu'à ce que celui-ci accepte que les araignées montent sur son avatar virtuel. Par effet de transfert, et probablement par effet du sentiment de présence (Price & Anderson, 2007; Riva et al., 2019), la phobie du participant aura alors disparu dans le monde virtuel mais également dans le monde réel (Miloff et al., 2019; Tardif et al., 2019). Ce format de recherches et d'applications cliniques existe également pour le traitement général de l'anxiété (Glennon et al., 2018; Mitrousia & Giotakos, 2016; Oing & Prescott, 2018) et des tentatives ont été réalisées concernant les psychoses et notamment la schizophrénie (Rus-Calafell et al., 2013, 2018; Kargar et al., 2019). Des études ont également vu le jour en réalité virtuelle pour prévenir l'utilisation du tabac (Caponnetto et al., 2018), la prévalence du vertige (Freeman et al., 2018), de la peur de l'avion (Czerniak et al., 2016; R. T. da Costa et al., 2008), des addictions aux d'argent (Giroux et al., 2013), de la phobie sociale (Salehi et al., 2020), mais aussi pour assurer la prise en charge des troubles alimentaires, addictifs, de l'attention et de l'hyperactivité, de la dépression et du stress (Gregg & Tarrier, 2007; D. Freeman et al.,

2017; Jerdan et al., 2018; Roussos et al., 2018; Wallach et al., 2011), et même la pédophilie (Renaud et al., 2011). A bien des égards, la réalité virtuelle peut être considérée dans ce cadre comme une boîte de Skinner (Lanier, 2017) : un paradigme de conditionnement et de déconditionnement dont le transfert dans la vie réelle repose sur le sentiment de présence du participant. De plus, ce paradigme de conditionnement et de déconditionnement possède l'avantage de pouvoir être automatisé. Freeman et al. (2018) ont par exemple réalisé des essais cliniques sur les possibilités d'automatiser une thérapie cognitivo-comportementale en réalité virtuelle dans le but de réduire la peur des hauteurs, et ce à l'aide d'un coach virtuel guidant le patient dans les étapes de la thérapie. Les résultats de cette étude suggèrent une diminution de la peur des hauteurs suite à la thérapie automatisée, ce qui ouvre la porte à de nombreuses autres possibilités qui pourraient permettre un accès plus large à la prise en charge des phobies, par exemple pour en réduire le coût pour les patients ou les proposer dans des territoires éloignés des cabinets de psychologues.

2.1.5. Ethique

2.1.5.1. Effets physiologiques

Les effets propres (et potentiellement négatifs) de l'immersion sur le corps de l'utilisateur, et notamment celui des enfants, sont encore largement méconnus, même si la littérature reporte de nombreux effets positifs, du moins chez les adultes (Slater & Sanchez-Vives, 2016). HTC Vive et Oculus Rift, sans doute pour se prémunir d'attaques juridiques, interdisent par exemple leurs produits aux moins de 13 ans. Malgré une certaine demande et de nombreux journaux proposant des réponses (*Is VR Safe for Kids?*, 2016), il existe aujourd'hui très peu d'informations empiriques scientifiques sur ces effets. Il convient de souligner que la question des effets négatifs ou positifs des écrans et technologies associées ne fait pas l'objet que de débats scientifiques et médicaux, mais aussi politiques, sociaux et culturels. Sur cette question, il est aussi courant de lire des pamphlets ouvertement réactionnaires dénonçant – sans appui empirique – des effets délétères absolus des écrans sur la santé, tout comme il est courant de voir ces questions niées au nom de l'inexorable marche du progrès. Certaines études se sont tout de même intéressées aux effets kinésiologiques, montrant que l'utilisation prolongée peut induire des inconforts musculo-squelettiques (Penumudi et al., 2020; Samani et al., 2015). Concernant la vision, l'association Common Sense Media qui étudie les effets des technologies sur les enfants tout comme le Virtual Human Interaction Laboratory de l'Université de Stanford ou même les constructeurs de casque conseillent de faire des pauses à intervalles réguliers (entre 15 et 30 minutes pour les adultes, et toutes

les 5 minutes pour les enfants). Les résultats sur la vision sont mitigés, certaines études ne trouvant aucun impact, alors que d'autres suggèrent de potentiels effets sur l'acuité visuelle chez l'enfant tout comme l'usage abusif des écrans (Rauschenberger & Barakat, 2020). L'utilisation démesurée des écrans durant les premiers âges de la vie est par ailleurs déconseillée par l'OMS dans son rapport sur la vision de 2019 (*World Report on Vision*, 2019). En collaboration avec des chercheurs de l'Université de Stanford comme Jeremy Bailenson (2018), l'association Common Sense Media a également produit un rapport sur l'utilisation de la réalité virtuelle pour les enfants (*Virtual Reality 101*, 2020) qui, au-delà des questions sur la vision, soulève d'autres questions intéressantes, notamment les liens entre virtualité et réalité qui peuvent impacter le développement de l'imaginaire de l'enfant.

2.1.5.2. Ethique en recherche

Afin de discuter des considérations éthiques de la réalité virtuelle, utilisons l'exemple canonique des études sur la soumission à l'autorité de Stanley Milgram (1963). Le principe général décliné en de multiples versions est d'inviter des participants pour une étude dont l'intitulé officiel est une expérimentation de nouvelles techniques d'apprentissage. Les participants naïfs se retrouvent donc en situation de professeurs devant faire apprendre certains items à un autre participant (un compère). Lorsque cet autre participant se trompe, le participant est invité par l'expérimentateur, représentant de l'autorité, à envoyer des chocs électriques de plus en plus forts. Le but réel de l'étude n'est pas d'analyser les processus d'apprentissage, mais ceux de la soumission à l'autorité. Les résultats de l'étude Milgram montrent que les participants se soumettent généralement à l'autorité du professeur, et ce jusqu'à envoyer des chocs potentiellement mortels et ce alors que leur (fausse) victime les supplie d'arrêter l'expérimentation. Les différentes déclinaisons de ce protocole ont mis en lumière le fait que le taux d'acceptation (ou de soumission) diffère selon la distance et l'interaction entre le participant et sa victime. Cette expérimentation est au cœur de large débats en éthique de la recherche, que ce soit à cause de la duperie utilisée ou du potentiel traumatisme psychologique de l'individu lorsqu'il se découvre comme potentiel agent légal de l'autorité (Herrera, 2001; Tolich, 2014). Tous les auteurs s'accordent à dire que les expérimentations de Milgram seraient aujourd'hui impossibles à reproduire, car ne correspondant pas aux normes des comités éthiques actuels (McArthur, 2009). Pourtant, Slater et al. (2006) en ont proposé une version en réalité virtuelle, retrouvant certains résultats de Milgram (1963), notamment concernant les rapports entre distance interpersonnelle et soumission à l'autorité, alors que tous les participants étaient bien conscients que les apprenants étaient des agents virtuels. Les résultats de leur étude, au-delà de retrouver certaines données de l'expérience princeps, semblent

surtout – par des mesures de réponses au stress – confirmer le fait que les individus réagissent face à des agents virtuels de façon similaire à des agents humains. Cette donnée peut être considérée comme une illustration des immenses potentialités de la plasticité neuronale, notamment lors de son adaptation au milieu. Ces observations induisent certains auteurs à affirmer que la réalité virtuelle, par exemple dans une situation d'incarnation immersive dans un corps étranger, peut avoir des effets neurobiologiques et cognitifs adaptatifs inconnus (Madary & Metzinger, 2016). Ces derniers considèrent également que la durée des effets de l'immersion ainsi que de la manipulation expérimentale virtuelle est inconnue, plus précisément lors des situations d'incarnation. Madary & Metzinger (2016) précisent que ces interrogations éthiques sur la réalité virtuelle doivent prendre en compte le caractère flou de la délimitation entre virtualité et réalité. Pour toutes ces raisons, ils présentent un code de conduite de l'expérimentation en réalité virtuelle et mettent en garde contre les potentielles dérives. Il convient de rappeler que la virtualité n'est pas le contraire de la réalité, et que les manipulations et comportements virtuels sont tout aussi réels que les expérimentations classiques. En effet, si la plasticité cérébrale permet l'émergence du sentiment de présence et donc de tous les apports de la technologie décrits précédemment, elle peut aussi faire de la réalité virtuelle une des rares définitions à connotation négative de Lanier (2017) : « The perfect tool for the perfect, perfectly evil Skinner box » (Skinner, 1948).

2.1.5.3. Ethique grand public

A plus grande échelle et au-delà des aspects physiologiques comme l'impact de la technologie sur la vision, sur la fusion réalité-virtualité ou encore les possibilités de manipulations comportementales, certains auteurs mettent en garde contre une récolte intrusive des données générées par la réalité virtuelle. En effet, les outils de réalité virtuelle sont équipés, que ce soit pour leur fonctionnement ou leur optimisation, de nombreux capteurs. Le HTC Vive classique comporte par exemple une caméra, un microphone, des accéléromètres, des gyroscopes, des capteurs de proximité ainsi que bien évidemment une synchronisation avec deux stations infrarouges permettant la capture de la position et du mouvement non seulement du casque, mais aussi des manettes. En additionnant des fonctionnalités émergentes comme l'oculométrie ou la reconnaissance faciale des émotions aux techniques d'apprentissage machines et en associant ces données aux traces de l'activité numérique laissées par tout utilisateur (géolocalisation, contenus de recherche, comptes de réseaux sociaux, logiciels associés), la réalité virtuelle pourrait se révéler comme l'ultime espion du quotidien. Une analyse récente (*What Does Your VR Headset Know about You, and Who Is It Telling?*, 2018) a par exemple comparé les politiques de confidentialité des différents fabricants de casques, montrant que la plupart enregistrent explicitement les

mouvements physiques alors que d'autres, de façon plus vague, se contentent d'avouer une capture des « événements dispositifs ». De nombreuses études ont déjà étudié les possibilités d'identification de l'utilisateur par les données générées par la réalité virtuelle, obtenant une fiabilité de l'identification jusqu'à 90% (Kupin et al., 2019; Pfeuffer et al., 2019). Certains auteurs, tel Bailenson (2018), plaident pour une protection des données comportementales générées par la réalité virtuelle, au titre qu'elles constituent des possibilités non seulement d'identification personnelle, mais que ces dernières présentent un couplage avec des données médicales (cognitives et sensorimotrices) potentiellement dangereux. Les compagnies de réalité virtuelle pourraient en effet être appâtées par l'idée de revendre ces données médicales identificatoires à des compagnies tierces et donc faire de cette technologie un nouvel espion du quotidien.

Au-delà de la confidentialité des données, d'autres questions éthiques concernant la réalité virtuelle peuvent être soulevées, notamment vis-à-vis du traitement juridique de l'espace virtuel. Un attouchement virtuel d'avatar peut-il être considéré comme une agression sexuelle ? La copie d'un avatar et d'un pseudonyme peut-elle être considérée comme une usurpation d'identité ? La perturbation d'un salon public peut-elle être réprimée au nom de l'ordre public ? Ces questions sont en plein développement et font l'objet de nombreux débats, comme le montre le rapport légal conjoint de l'Université de Pennsylvanie, de Stanford et de Californie (Lemley & Volokh, 2018).

2.1.5.4. Ethique environnementale

La réalité virtuelle, comme toute technologie de l'information et de la communication, a un impact environnemental mesurable. En effet, au-delà de la production et de l'acheminement même du matériel, la réalité virtuelle nécessite une forte puissance de calcul, notamment pour le rendu graphique en temps réel, à laquelle s'ajoutent des coûts énergétiques classiques nécessaires aux ordinateurs et aux serveurs. La production matérielle de ces outils s'inscrit largement dans une course technologique rendant très rapidement le matériel obsolète, en plus de nécessiter des ordinateurs de plus en plus performants. Dans ces conditions, sont généralement différenciés deux types d'effets sur l'environnement : les effets environnementaux directs, qui correspondent aux ressources utilisées et aux émissions causées par leur production et leur utilisation, et les effets indirects, qui correspondent eux aux changements comportementaux associés à la consommation et à la production de ces technologies. Ces deux types d'effet font des technologies de la communication – la réalité virtuelle – un facteur pertinent dans la réalisation de nombreux objectifs de développement durable de l'Organisation des Nations Unies (*Sustainable Development Goals*, 2020), notamment ceux de la Consommation et de la production responsables et de l'Ac-

tion pour le Climat. De nombreuses études, ainsi que la revue de Bieser & Hilty (2018), considèrent que les technologies de l'information ont un impact globalement positif dans la réduction des gaz à effet de serre. En effet, il semblerait que les coûts directs de leur production et consommation, près de 5% de l'énergie mondiale totale en 2015 (Gelenbe & Caseau, 2015), soit au moins contrebalancés par des effets indirects réduisant les émissions dans d'autres domaines (Bieser & Hilty, 2018). Ceci ne doit pas empêcher les acteurs de réfléchir et agir éthiquement, par exemple en cherchant à réduire le coût énergétique du rendu vidéo (Leng et al., 2020), ou encore en incitant les chaînes de production à suivre des codes compatibles avec les objectifs de l'Organisation des Nations Unies. Il est regrettable qu'il n'existe que peu d'études évaluant plus précisément les coûts et bénéfices de la réalité virtuelle comparés à d'autres technologies. En effet, il peut être avancé que la réalité virtuelle fasse partie de solutions destinées à réduire à grande échelle les productions énergétiques, par exemple en ajoutant une dimension plus sociale au télétravail ou encore en permettant des rassemblements internationaux (réunions professionnelles, congrès scientifiques) à bas coûts pour l'environnement lorsque comparés aux émissions carboniques du transport aérien (Terrenoire et al., 2019). La faisabilité de ces rassemblements virtuels a d'ailleurs été révélée par la crise de la COVID-19 : le Laval Virtual, un salon annuel universitaire et industriel, a aménagé une édition 2020 entièrement virtuelle de l'évènement pouvant accueillir jusqu'à 10 000 participants en simultané (Vergara, 2020). Il est souvent avancé que les systèmes de télécommunication classiques manquent d'interaction pour des réunions ou des entretiens importants, particulièrement concernant la communication non verbale. La réalité virtuelle pourrait donc être une solution à ces questions, notamment en incorporant le sentiment de présence.

2.2. Le sentiment de présence

Malgré son apparition relativement récente à l'échelle de la science, dresser une revue exhaustive du sentiment de présence rendant compte de tous les travaux publiés se révélerait être une tâche presque aussi difficile que de dresser une revue complète de la réalité virtuelle. Lombard & Jones (2007) ont par exemple identifié 1 831 publications constituant directement la littérature sur le sentiment de présence, nombre probablement encore plus conséquent aujourd'hui et qui prendrait des proportions gigantesques en incorporant des concepts annexes tels que la conscience ou l'attention. Il convient de préciser que le sentiment de présence étant un objet d'étude largement transdisciplinaire (Lombard & Jones, 2007; Sanchez-Vives & Slater, 2005), ces publications sont issues de domaines très différents pour lesquels les concepts de présence ne se superposent pas forcément. Depuis la théologie avec la présence divine jusqu'aux différentes philosophies de l'esprit et de la conscience ou aux théories neurocognitives bayésiennes, il apparaît normal que le sentiment de présence revête des sens parfois différents et soit associé à des concepts multiples. Il s'agit bien évidemment d'une richesse à prendre en compte, mais aussi d'une difficulté supplémentaire qui consiste à ne pas se perdre dans les diverses visions des auteurs discutant de concepts parfois similaires sous des termes différents. Cette revue de littérature du sentiment de présence est donc divisée en différentes parties. Elles sont destinées, en mobilisant plusieurs angles de vue et domaines d'utilisation, à proposer au lecteur une définition et une compréhension élargies du concept. Les travaux présentés ici seront donc ceux considérés, soit arbitrairement par l'auteur soit par d'autres chercheurs comme conséquents ou nécessaires pour une appréhension globale du sentiment de présence. Ce faisant, les différents domaines et raisonnements évoqués devraient également permettre d'exposer les apports de l'étude du sentiment de présence.

2.2.1. Téléprésence et présence

2.2.1.1. Immersion et présence

Avant toute chose, le sentiment de présence est à distinguer de l'immersion ; il s'agit ici d'un quasi-consensus suffisamment rare dans le domaine pour être noté : l'immersion réfère aux capacités techniques du système, alors que le sentiment de présence en est la conséquence psychologique (Slater & Wilbur, 1997). L'immersion est entièrement quantifiable et mesurable (une CAVE, avec une stéréoscopie active ou passive, avec tant de faces immersives, dont les projecteurs utilisent telle puissance de calcul, telle résolution et tel taux de rafraîchissement) alors que le sentiment de présence est par nature subjectif : certains auteurs parlent d'ailleurs du « qualia de présence » pour souligner cet aspect (Kanai & Tsuchiya, 2012; Pillai et al., 2013; Slater, 2009).

Le sentiment de présence peut en effet être rapporté et inféré à partir de données comportementales, mais il ne peut pas être quantifié avec précision. Quant à l'immersion, certains auteurs en ont noté les possibilités taxonomiques : Slater & Wilbur (1997) en définissent par exemple quatre dimensions caractéristiques. L'immersion est pour eux : *Inclusive*, dimension qui correspond au degré auquel la réalité physique est cachée par le système immersif, *Extensive*, degré qui indique la portée des modalités sensorielles procurées par le système immersif, *Surrounding*, degré qui indique la capacité englobante du système immersif, et *Vivid*, degré qui correspond à la résolution, fidélité et variété d'énergie simulée au sein d'une même modalité : « Vividness is concerned with the richness, information content, resolution, and quality of the displays » (Steuer, 1992). De leur côté, Witmer & Singer (1994) déterminent quatre composants de l'immersion relativement similaires à ceux de Slater & Wilbur (1997) : *Control factors*, qui correspondent au contrôle général du participant sur l'environnement, *Sensory factors*, qui correspondent au nombre et à la qualité des modalités sensorielles utilisées, *Distraction factors*, qui correspondent à l'inhibition de l'environnement physique réelle, et *Realism factors* qui correspondent au degré de réalisme et de cohérence de l'environnement virtuel par rapport aux informations du monde physique. Il convient de remarquer que Witmer & Singer (1994) incorporent dans leur taxonomie de l'immersion des facteurs humains, notamment dans la partie *realism factors* qui englobe également l'anxiété du participant ou encore l'intérêt que celui-ci éprouve pour l'expérience. Pour cause, la distinction entre immersion et présence n'est réellement adoptée de façon unanime que vers la fin des années 1990, Witmer & Singer (1994) utilisant encore les termes de façon interchangeable. Les études évaluant l'impact de chacun des aspects de l'immersion sur le sentiment de présence sont nombreuses ; elles sont détaillées plus en aval dans ce travail au sein d'une partie traitant des facteurs modérateurs du sentiment de présence.

2.2.1.2. La question de la présence

Le sentiment de présence en réalité virtuelle est donc considéré comme la conséquence subjective de l'immersion objective du système (Slater & Wilbur, 1997). Il est défini de façon purement phénoménologique comme la sensation d'être là, « of being there » (Heeter, 1992), ou encore comme « the phenomenal state by which an individual feels located and active in an environment » (Biocca et al., 2001). C'est ce sentiment d'être dans l'environnement qui donne au participant la possibilité d'agir comme s'il y était réellement et donc au chercheur d'observer un comportement écologique ou virtuellement écologique, au sens premier du terme (Parsons, 2015; Parsons et al., 2017). C'est ce sentiment de présence qui donne aux sages-femmes dans une simulation virtuelle de crise la sensation d'être réellement en situation d'urgence, de devoir agir

vite, prendre des décisions rapidement et ainsi d'apprendre de leurs erreurs virtuelles. C'est le sentiment de présence qui fait que le patient brûlé immergé dans un monde de glace ne sent plus la douleur de ses plaies ; il est ailleurs, il est dans ce monde de glace, là où ses blessures ne sont pas. Hoffman, Sharar, et al. (2004) ont en effet trouvé une corrélation positive forte entre sentiment de présence et effet analgésique de la réalité virtuelle, ce qui a été confirmé par la suite (Gutierrez-Martinez et al., 2010). De la même façon, le sentiment de présence est primordial dans l'utilisation de la réalité virtuelle en thérapie, notamment celle utilisant la méthode d'exposition. Le sentiment de présence est en effet corrélé à l'anxiété ressentie dans ces thérapies (Ling et al., 2014), anxiété elle-même nécessaire lors de l'utilisation des techniques d'exposition, et il est également suggéré comme fondamental pour l'efficacité de la thérapie (Ling et al., 2014; Price & Anderson, 2007; Wallach et al., 2011).

Le *Larousse* donne de la « présence » la définition suivante : « Fait pour quelqu'un, quelque chose de se trouver physiquement, matériellement en un lieu déterminé » (Larousse, 2020). Il est facilement envisageable de considérer que c'est à cette définition que Marvin Minsky pense lorsqu'il utilise pour la première fois le terme de « présence », auquel il accole le préfixe « télé » signifiant « loin » ou « au loin » en grec (Minsky, 1980). Ce néologisme est signifiant car Minsky décrit à ce moment-là non la sensation d'être dans un environnement virtuel, mais celle d'être au contrôle d'un robot, d'un opérateur à distance, d'un « téléopérateur » (Figure 7). L'utilisateur de ces robots est donc « présent », non pas dans le virtuel, mais bien dans le réel, mais ailleurs que là où il est physiquement, via le robot. Les téléopérateurs sont des robots permettant à l'humain d'interagir – à distance – sur son environnement, par exemple lorsque l'environnement est hostile ou inaccessible (Fisch et al., 2003). Cette filiation entre téléopérateurs et réalité virtuelle est illustrée par le nom du journal de presse du MIT dans lequel seront publiés des articles fondateurs du domaine durant les années 1990 : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*. C'est d'ailleurs à la création de cette revue en 1992 que disparaît le suffixe *tele* pour ne plus contenir que le cœur du concept *presence*. Mais une certaine confusion subsiste, l'utilisation faite de chacun des termes variant d'un auteur à l'autre. En effet, Sheridan, co-fondateur de la revue, utilise dans un des plus célèbres articles sur le concept (1992) le terme générique de *presence* ou *virtual presence* pour définir la perception d'être dans un environnement et réserve le terme *telepresence* pour les situations de téléopérations ; alors que dans le même numéro, Held & Durlach (1992) utilisent le terme générique de *telepresence* pour désigner les deux situations. En accord avec ces derniers, Steuer (1992) définit la présence comme la perception naturelle d'un environnement alors qu'il définit la téléprésence comme cette même expérience de présence médiée par un moyen de communication (réalité virtuelle, téléopérateur ou même télévision). En français les

termes « sentiment de présence », « sensation de présence » ou même simplement « présence » sont utilisés de façon indifférenciée, alors que « téléprésence » se réfère à l'utilisation des téléopérateurs. Le temps semble avoir donné raison à Sheridan ; le terme de « présence » est en effet aujourd'hui utilisé de façon générique pour définir le sentiment subjectif d'existence dans un environnement donné, virtuel ou non, alors que celui de « téléprésence » est réservé aux téléopérations (Zahorik & Jenison, 1998).

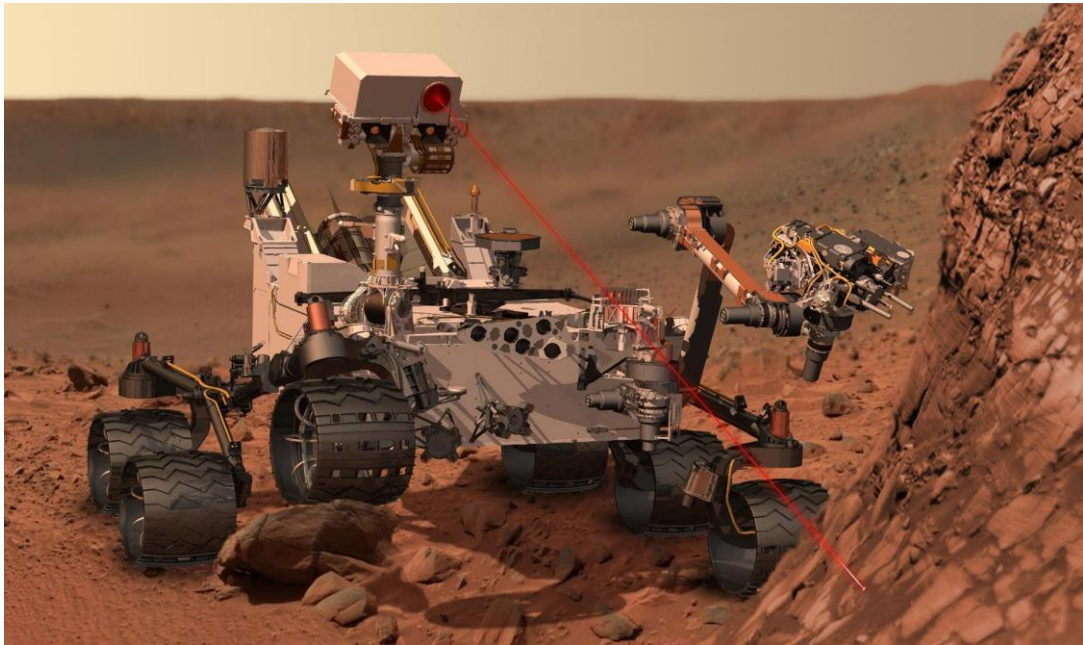


Figure 7. – Représentation visuelle du téléopérateur Curiosity de la NASA explorant le sol de Mars.

La question du sentiment de présence est aussi centrale que controversée, comme le montre le questionnement de Sheridan (1992) : « is the sense of "presence" simply a concomitant benign phenomenon, or even a distraction ? Or is the quality of "presence" the critical psychological indicator of physical stimulus sufficiency? ». Certains auteurs font effectivement de la présence un concept clé de la réalité virtuelle (Barfield & Weghorst, 1993), parfois jusqu'à l'élargir à tous les autres médias comme les journaux, les livres ou le téléphone (Steuer, 1992), ou et à des concepts plus généraux encore comme la conscience (Giuseppe Riva & Waterworth, 2003) ou l'attention (Draper et al., 1998). D'autres auteurs considèrent qu'il s'agit d'un épiphénomène, d'une simple continuité avec l'expérience quotidienne : toute représentation étant médiée par la perception pour forger un modèle interne, le sentiment de présence ne serait que le résultat d'une médiation de plus (Loomis, 1992). Par exemple, dans son livre teinté d'autobiographie retraçant l'histoire de la réalité virtuelle, Lanier (2017) n'évoque pas une seule fois le concept de la présence, utilisant le concept d'immersion. De même, et malgré les nombreux modèles de l'immersion et de la réalité

virtuelle présentés dans le *Traité de la Réalité Virtuelle*, Fuchs et al. (2006) n'évoquent le sentiment de présence que de façon très épisodique, lui préférant l'étude des interfaces comportementales (motrices et sensorielles) considérées comme le noyau de l'interaction homme-machine. Quoi qu'il en soit, le sentiment de présence comme phénomène et concept théorique s'est progressivement détaché de la technologie propre (les téléopérateurs), et nombre de chercheurs se sont mis à examiner les mesures et composants de ce sentiment d'être là, d'exister dans un environnement. Ceci a eu pour effet de provoquer des comparaisons avec la conscience d'être dans la réalité physique, déjà étudiée par les philosophes et psychologues. Initialement issus de la réalité virtuelle, ces questionnements ont tôt fait de se rapprocher de questions ontologiques inévitables, historiquement étudiées par les philosophes de l'esprit et plus récemment par les sciences cognitives et neurosciences. L'étude de la réalité virtuelle dans ce cadre sert de modèle, à la fois théorique et empirique, à l'étude du fonctionnement général de la perception et de la cognition, apportant une contribution riche au domaine. Puisque ces questions ont largement contribué à la définition du concept et ont, parfois suite à de larges dissensions, provoqué des compréhensions différentes du concept, il convient d'aborder les théories de la cognition et de la perception et donc la question ontologique de la présence.

2.2.2. Ancrages théoriques

2.2.2.1. Théories de la perception et de la cognition

Deux conceptions distinctes de la perception et de la cognition relevant de vues ontologiques différentes seront confrontées dans ce travail afin de dissenter sur la nature du sentiment de présence. Il convient de les présenter car elles vont notamment définir ce qu'est le sentiment de présence, ses déterminants, ses relations avec la perception et la cognition, comment il peut être mesuré et son impact sur le participant, bref, sa nature.

2.2.2.1.1. *Théories rationalistes*

La première théorie de la perception est la position classique rationaliste, qui repose sur la compréhension de la relation entre les domaines psychologiques et physiques. Il s'agit de la vision métaphysique sous-tendant la grande majorité des travaux de recherche en cours ou passés, notamment en sciences cognitives. Ses porte-étendards les plus célèbres sont Descartes, Spinoza ou encore Leibniz. Aristote concevait déjà les sens comme des récipients passifs remplis par les informations de l'environnement, ce que Descartes ne renie pas (dans Auvray & Fuchs, 2007). Dans ce cadre, la connaissance est obtenue à l'aide du raisonnement (et non de l'expérience pure) sur le monde physique, à partir des informations reçues passivement : le monde

physique est donc capté par le système perceptif puis encodé de façon interne. La conceptualisation de cette étape est fondamentale en ce qu'elle détermine la nature du lien entre l'environnement et le sujet. Elle résulte d'une vision de la perception et de l'existence dualiste : au-delà de la séparation corps-esprit il existe une séparation infranchissable entre le monde psychologique, propre et cher à Descartes – le fameux *cogito* – et le monde physique, une réalité inaccessible distincte ; il y a un sujet et il y a un objet.

Ce cadre ontologique est le socle théorique du cognitivisme classique, successeur (non totalement incompatible) du behaviorisme, à la différence que celui-ci permet l'évaluation des états mentaux : les états mentaux étant des représentations stockées sous formes de symboles, il est possible de les analyser en tant que tels, extraits du contexte (Rescorla, 2020). Certaines thèses de cette école cognitiviste portent d'ailleurs le nom de théories représentationnelles ou computationnelles pour rendre compte du fait que la cognition du monde extérieur est une computation de symboles, et que les symboles sont les représentations extraites du monde (Pitt, 2020). Dans ce cadre, la perception se fait de façon linéaire à la façon d'une porte à détecteur de mouvement : d'abord une caméra détecte des différences rapides de niveaux de gris entre des pixels proches (input), puis ces différences sont intégrées dans l'ordinateur et associées sous forme de symbole comme signifiant la présence d'un individu (computation), et enfin c'est la détection de ce symbole qui déclenche l'ouverture de la porte (output). Cet ensemble peut donc être découpé en séquences procédurales à l'instar des langages de programmation. En effet, dans le cognitivisme classique, la métaphore de l'ordinateur est centrale ; ces théories suggérant généralement que la cognition humaine suit ces mêmes aspects procéduraux. Ce traitement linéaire de l'information, depuis une entrée sensorielle passive jusqu'à une sortie active, est celui défini par Shannon dans sa théorie mathématique de l'information (Shannon, 1948) et correspond également à celui du modèle pionnier de l'attention de Broadbent (1958), qui ont tous deux apporté des connaissances et outils fondamentaux pour l'étude de la cognition humaine et de l'information au sens large (Rabbitt, 2015; Verdü, 2000). Cette conceptualisation de la cognition a permis le développement de la plupart des technologies actuelles, et de façon plus large on peut considérer le rationalisme comme le fondement des sciences modernes. Les théories computationnelles classiques et leurs recherches des règles de représentation et de computation du cerveau ont donné naissance à de nombreux sous-courants dont le développement et les différences sont relayées dans l'article de Rescorla (2020).

2.2.2.1.2. Théories écologiques

Le second cadre théorique est celui développé notamment par Heidegger, Merleau-Ponty ou J.-J. Gibson. Ces auteurs font de la perception un système actif et non passif. Pour Heidegger, cette approche lui vient de l'herméneutique, l'interprétation des textes anciens (Heidegger, trad. 1992). En effet, l'interprétation des textes anciens ne serait jamais purement et rationnellement analytique mais toujours biaisée par les croyances, la langue utilisée, les habitudes et le contexte du sujet la réalisant ; il en va de même pour son rapport au monde. Le sujet est considéré par le philosophe comme « être-jeté » au monde : continuellement acteur de ce monde, il n'est pas capable d'en avoir une vision détachée, analytique. Une métaphore utilisée par Heidegger (Heidegger, trad. 1992) et reprise par Zahorik & Jenison (1998) est celle du marteau et de son utilisation. Heidegger considère en effet que lorsqu'un sujet réalise une action engageante il n'utilise ni n'a besoin de représentation de ce même objet ; l'outil devient transparent aux yeux de son utilisateur, et seul un événement particulier peut le rendre saillant, par exemple s'il casse. Une analogie moderne pourrait être celle de la souris de l'ordinateur. Il est en effet difficile de soutenir que lorsque nous utilisons un ordinateur nous avons une représentation continue de la souris alors même que nous interagissons constamment avec elle. Seule une rupture dans cette relation à la souris peut rendre l'objet visible et déclencher une forme de représentation de l'outil (par exemple destinée à le réparer), mais il ne s'agit pas, pour Heidegger, du fonctionnement premier.

Cette vision est très largement poursuivie par celle de James J. Gibson qui fait de l'interaction entre l'environnement et le sujet le cœur de la cognition et de l'évolution (1979). Pour J.-J. Gibson, tout comme pour Heidegger, la séparation entre le sujet et l'objet est rejetée. La perception consiste ici en une sélection active d'informations supportant une potentielle action, informations qu'il nomme « affordances » (J.-J. Gibson, 1966, 1979) ; l'environnement peut être directement compris sans le besoin de médiation qu'est la représentation. Il considère donc que les objets ne sont pas représentés et que seules les affordances produites par l'environnement sont perçues directement ; la perception n'est donc pas un mécanisme de l'animal pour analyser l'environnement, mais une conjonction entre les deux, l'environnement évoluant par effet de l'action et les actions par effet de l'environnement. Si pour Heidegger il peut exister des représentations (lors d'évènements inhabituels : le marteau casse, par exemple) mais qu'elles ne constituent pas l'existence normale et quotidienne, pour J.-J. Gibson celles-ci n'existent tout simplement pas. Cette interaction fonctionnelle entre l'action et l'environnement ancre la perception dans un contexte écologique et fait du couplage action-perception la pierre angulaire de la cognition et de l'expérience humaine. Les dualismes entre sujet-objet et entre perception-action sont ainsi rejetés, au même titre que le fameux dualisme cartésien corps-esprit. Le plus célèbre des détracteurs contemporains de ce

dualisme cartésien est Antonio Damasio, qui explicitement nomme son livre *Descartes' Error : Emotion, Reason, and the Human Brain*, et dans lequel il révèle l'importance des émotions et du corps dans le raisonnement humain (Damasio, 1994) :

... the body as represented in the brain, may constitute the indispensable frame of reference for the neural processes that we experience as the mind; that our very organism rather than some absolute experiential reality is used as the ground reference for the constructions we make of the world around us and for the construction of the ever-present sense of subjectivity that is part and parcel of our experiences; that our most refined thoughts and best actions, our greatest joys and deepest sorrows, use the body as a yardstick.

Cette approche est en partie inspirée de celle de J.-J. Gibson pour qui le corps, en perpétuelle interaction avec son environnement fait partie entière de la cognition. J.-J. Gibson rejette le modèle linéaire de l'information de Shannon, qu'il considère pertinent pour rendre compte du fonctionnement des téléphones et autres technologies mais pas de la perception (J.-J. Gibson, 1979). Le pionnier de la phénoménologie, Merleau-Ponty, conceptualisait déjà, lui aussi, la perception et la connaissance comme une expérience consciente incarnée, considérant qu'il « doit y avoir un je peux, avant un je sais » (Merleau-Ponty, 1945).

Mais c'est plus tard avec les travaux sur les émotions de Damasio ou ceux sur les métaphores vécues de Lakoff que vont se développer de nouvelles théories de la cognition remettant en question sa rationalité absolue (Damasio, 1994; Lakoff & John, 1980). Ces travaux ont permis de soulever les failles d'une théorie de la cognition classique dualiste et ont donné naissance à différentes théories dites écologiques, situées, intégrées ou encore incarnées, parfois regroupées sous le terme de *enactivism* (Wilson & Foglia, 2011), et dont un des ouvrages de référence est *The Embodied Mind* (Varela et al., 1992). Toutes ces théories ont en commun, à l'instar des positionnements de J.-J. Gibson et de Merleau-Ponty, de reconnaître les possibilités d'action comme cadre explicatif de la relation entre le sujet et les propriétés de l'environnement et donc sa perception. Ainsi, la relation entre systèmes perceptifs, systèmes cognitifs et systèmes moteurs n'est plus causale et linéaire comme c'est le cas classiquement, mais constitutive (Adams, 2010). La cognition humaine n'est plus considérée comme centralisée (comportant un système perceptif qui procure l'information au processeur central qui transmet ses ordres au système moteur), mais distribuée entre les différents systèmes qui sont intrinsèquement connectés. Dans ces théories, l'espace phénoménologique du participant – son interaction continue avec l'environnement – est au cœur de l'expérience et donc de la cognition humaine. Pour une revue complète de l'histoire et de la philosophie de la psychologie écologique, nous renvoyons à la revue de Lobo et al. (2018) ou à l'article de Wilson & Foglia (2011).

2.2.2.2. Ontologies du sentiment de présence

2.2.2.2.1. Une présence rationaliste

De ces positionnements théoriques découlent diverses appréhensions du phénomène de présence. Il apparaît ainsi que, dans le cadre rationaliste, la présence en réalité virtuelle ne serait qu'une médiation de plus entre le monde physique et l'individu, médiation artificielle se superposant à la médiation naturelle de la perception et de la représentation. Il s'agit donc d'une continuité avec les phénomènes de la vie quotidienne (Loomis, 1992). Tout comme l'être humain possède cette propension naïve à oublier que son expérience au monde est médiée par sa perception car cette médiation lui est instinctivement invisible (Loomis, 1992), la présence en réalité virtuelle pourrait également être définie comme le degré d'invisibilité de cette médiation artificielle. Cette définition est d'ailleurs celle de The International Society for Presence Research (2000) :

Presence is a psychological state or subjective perception in which even though part or all of an individual's current experience is generated by and/or filtered through human-made technology, part or all of the individual's perception fails to accurately acknowledge the role of the technology in the experience.

Cette définition est elle-même inspirée de celle de Lombard & Ditton (1997): « the perceptual illusion of nonmediation ». Elle est caractérisée à la fois par les propriétés système d'une part (la capacité à créer une illusion semblable à celle de la perception quotidienne) et les caractéristiques utilisateur (la capacité à créer une représentation interne semblable à la représentation quotidienne) de l'autre. Dans ce cadre, l'accroissement du sentiment de présence correspond à une disparition de l'outil ; le but final étant de rendre la médiation artificielle totalement invisible aux yeux du sujet afin qu'il trouve en réalité virtuelle la naïveté quotidienne qui lui fait oublier la médiation de premier ordre, la perception.

2.2.2.2.2. Une présence écologique

Dans un cadre écologique, c'est l'interaction entre l'individu et son environnement, le couplage action-perception, les boucles sensorimotrices et donc les affordances qui seront constitutives du sentiment de présence (Coelho et al., 2009) ; en accord avec la pensée de Merleau-Ponty il ne s'agit pas seulement *of being there* mais aussi *of doing there* (Sanchez-Vives & Slater, 2005), et certains auteurs iront jusqu'à dire que le sentiment de présence est « tantamount to successfully supported action in the environment » (Zahorik & Jenison, 1998). Cette définition est à rapprocher de celle de Merleau-Ponty pour qui le champ perceptif est défini et ressenti par référence au corps en un système d'actions possibles (Angelino, 2008; Merleau-Ponty, 1945). Ce sentiment de présence est donc considéré dans un cadre écologique comme émergeant des actions supportées

par l'environnement. Paradoxalement, la même définition d'invisibilité de la réalité virtuelle peut donc en être donnée. En effet, le but de la présence dans ce cas est de présenter des affordances et des boucles sensorimotrices de la meilleure qualité possible, au point que la réalité virtuelle devienne comme le marteau ou la souris de l'ordinateur : invisible pour le sujet. Le sentiment de présence est donc à nouveau dépendant de facteurs systèmes (les capacités à faire émerger des affordances) comme de facteurs humains (les capacités à percevoir ces émergences), mais l'on comprend que c'est l'interaction entre ces deux types de facteur qui en devient primordial. Dans ce cadre théorique, le sentiment de présence en réalité virtuelle peut également être considéré comme une continuité des phénomènes quotidiens (seule la source des affordances varie ; interaction avec l'environnement physique ou interaction avec l'environnement virtuel), mais il serait plus pertinemment de le considérer comme l'illusion d'un changement de point de vue (IJsselstein & Riva, 2003). On comprend aussi que dans les théories écologiques, le sentiment de présence dépasse le simple rapport à l'outil. Puisque l'espace phénoménologique est au cœur de l'expérience et de la cognition humaine, la présence sous-tend la cognition autant qu'elle en dépend. Riva (2006), définit par exemple le sentiment de présence (virtuel ou non) comme le résultat d'une contextualisation dynamique continue supportant des actions ancrées dans la situation. Il va plus loin, argumentant que ce sentiment de présence a pour but l'identification du soi et la séparation entre le sujet et l'objet (Riva, 2006; Riva & Waterworth, 2003).

2.2.2.2.3. Vers un modèle ontologique éclectique de la présence ?

Au vu de ces différentes théories, nous constatons que le concept de sentiment de présence ne revêt pas pour tous la même importance : il n'est pour certains qu'un épiphénomène, une forme de médiation parmi tant d'autres puisque le monde objectif est fondamentalement différent et dissocié du monde psychologique (Loomis, 1992, 2016), alors qu'elle est d'une importance cruciale pour les théoriciens des cognitions écologiques qui vont jusqu'à en faire le support de la phénoménologie à travers la perception de l'interaction entre le sujet et l'environnement dont la distinction est généralement impossible (Coelho et al., 2009; Flach & Holden, 1998; Riva, 2006; Zahorik & Jenison, 1998). Ce présent travail n'a pas la prétention de clore un débat épistémologique aussi important. Sheridan (1999) affirme cependant qu'un modèle éclectique de la présence est envisageable. Il considère en effet que la possibilité de représentation de l'environnement sous forme d'interactions (affordances) est imaginable, tout comme les boucles sensorimotrices peuvent s'expliquer dans un monde où sujet et objet sont distincts. Considérons la question d'un flux visuel lors d'une marche sur tapis roulant en réalité virtuelle. Où se situe ce flux ? Dans les yeux et le cerveau du participant, comme l'appuient les théories représentationnelles, ou dans l'interaction

entre celui-ci et son environnement, comme le soutiennent les théories écologiques ? Sheridan (1999), dans son article au nom évocateur de *Descartes, Heidegger, Gibson, and God : Toward an Eclectic Ontology of Presence*, défend que ce flux visuel est situé dans les synapses du participant et qu'il s'agit d'un modèle affiné de ce à quoi correspond le fait de marcher dans un environnement ; donc de l'intégration d'une affordance sous forme de représentation. Il convient de dire que cette conclusion *in fine* situe cette argumentation dans un cadre rationnel computationnel, comme beaucoup de tentatives de conciliation des deux points de vue. Cependant, puisque le but de ce travail n'est pas donner une réponse à ce litige théorique, nous considérons cette tentative de réconciliation comme une réponse momentanément suffisante pour continuer l'investigation du sentiment de présence comme phénomène psychologique, tout en discutant et comparant au besoin les idées de l'une et de l'autre des écoles théoriques.

2.2.3. De la présence à la conscience

Ce titre est celui d'un article de Sanchez-Vives & Slater (2005) : *From presence to consciousness through virtual reality* dans lequel les auteurs défendent l'utilisation de la réalité virtuelle par les neuroscientifiques pour l'étude la conscience, notamment à travers l'investigation du sentiment de présence. Ils ne sont pas les seuls ; Loomis (1992) déclare par exemple que « presence is a fundamental property of consciousness ». L'étude de la conscience étant une question épineuse de la psychologie – si ce n'est la plus épineuse – il est courant que celle-ci soit divisée en plusieurs niveaux ou plusieurs composants. Parmi ces composants, le sentiment de présence est souvent évoqué. En effet, il semble relativement instinctif qu'être conscient de soi ou de son environnement passe par une sensation « d'être présent » dans son environnement. Cette partie est donc dédiée à la place du sentiment de présence au sein des études sur la conscience. S'il s'agit effectivement d'une occasion d'investiguer la relation entre ces deux concepts, il s'agit également de présenter des notions proches (ou similaires) de notre objet d'étude tels que les sentiments d'incarnation et d'agentivité ou encore de traiter la grande question de l'attention, et ceci dans le but d'en délimiter les acceptions et les différents niveaux d'analyse.

2.2.3.1. Présence médiée et présence interne

L'illusion perceptive de non-médiation proposée par Lombard & Ditton (1997) comme définition du sentiment de présence est – nous l'avons vu – une définition permettant potentiellement de répondre aux conceptions de la perception représentationnelle et de la perception écologique : dans le premier cas le sujet échoue à percevoir les stimuli extérieurs virtuels qui lui parviennent comme médiés par l'environnement (donc artificiels), et dans l'autre l'interaction du sujet avec son environnement est suffisamment bonne pour que des affordances en soient perçues. Dans les

deux cas, le but ultime est bien de rendre l'interface de la réalité virtuelle invisible au sujet : la réalité virtuelle parfaite étant celle que l'on ne perçoit pas. C'est de cet aspect crucial que Lombard & Ditton (1997) tirent leur définition : « an illusion of nonmediation occurs when a person fails to perceive or acknowledge the existence of a medium ». A travers cette définition il apparaît également qu'il est impossible d'expérimenter un sentiment de présence sans média, quel qu'il soit. Pour cette raison, cette définition de la présence est considérée par certains chercheurs comme une *media presence*, une présence comme médiation qui met l'accent sur le filtre technologique plus que sur le sentiment subjectif, contrairement à une *inner presence*, une présence interne qui mettrait l'accent sur le ressenti psychologique (par exemple la définition phénoménologique d'être là) et qui ne serait pas dépendante de la technologie (Coelho et al., 2009). Il n'est donc pas surprenant que les tenants d'une perception représentationnelle se rangent aisément derrière la définition de la présence médiée, alors que les tenants d'une perception écologique se rangent plutôt derrière une présence interne ; pour certains d'entre eux ce sentiment de présence va beaucoup plus loin et est une construction psychologique profonde, résultat de processus cognitifs neurologiques évolutifs constitutifs de la conscience (Riva & Waterworth, 2003; Riva, 2006).

2.2.3.2. Niveaux de présence et niveaux de conscience

En se fondant sur les travaux de Damasio (1999) et de ses conceptions des différents niveaux de conscience (*core consciousness* : le phénomène biologique du « où » et du « quand » ; *extended consciousness* : tout traitement d'information qui ne constitue pas directement l'expérience présente) ainsi que de ses conceptions du soi (*proto self* : les réseaux neuronaux qui constituent continuellement l'organisme et réagissent au métabolisme ; *core self* : l'entité continuellement générée par l'interaction avec l'environnement et se percevant comme distinct ; *autobiographical self* : l'enregistrement systématique des propriétés que l'organisme apprend sur lui-même), Riva & Waterworth (2003) proposent trois niveaux de présence : *proto presence*, une présence incarnée de perception du couplage action-perception permettant de se différencier de l'environnement extérieur, *core presence*, l'activité d'attention sélective réalisée par le sujet sur la perception, et *extended presence*, l'activité qui consiste à vérifier la pertinence de l'expérience pour le soi. Ces trois niveaux permettent à Riva & Waterworth (2003) d'analyser plus en détails certains types de présence selon le média utilisé : lire un livre intéressant peut par exemple permettre d'engager la *extended presence*, puisque le sujet sélectionne principalement des stimuli issus du média, mais pas les deux autres – *proto presence* et *core presence*. Au contraire, être immergé dans un environnement virtuel tout en étant préoccupé par des soucis personnels peut engager la *proto* et *core presence*, sans engager la *extended presence*. Une expérience de réalité virtuelle classique,

telle qu'un écran stéréoscopique sans captation du mouvement engagera elle la *core presence* et la *extended presence*, sans engager la *proto presence*. Mais Riva & Waterworth (2003; 2006) ne sont pas les seuls à rapprocher les études sur la conscience des études sur la présence, comme le démontre le titre de l'ouvrage de Revonsuo (2006) *Inner presence : consciousness as a biological phenomenon*. Sanchez-Vives & Slater (2005) considèrent par exemple la présence comme fondée sur une « transportation of consciousness into an alternative virtual reality. In a way then, presence is consciousness in that virtual reality ». Des centaines de définitions de la conscience existent, mais la plupart comportent plusieurs niveaux qui vont, à un moment ou à un autre, intégrer la perception-conscience de l'individu et la perception-conscience du monde. Pour Damasio par exemple (1998),

Consciousness occurs when we can generate, automatically, the sense that a given stimulus is being perceived in a personal perspective ; the sense that the stimulus is 'owned' by the organism involved in the perceiving ; and, last but not least, the sense that the organism can act on the stimulus (or fail to do so) that is, the sense of 'agency'.

Cette définition de la conscience n'est pas sans rappeler les définitions de la présence interne évoquées précédemment et chères à Riva (2006). Sanchez-Vives & Slater (2005) remarquent par exemple que « presence occurs when what is said about consciousness occurs within the domain of a virtual reality ». Il est en effet envisageable de considérer que pour un sujet, être présent en réalité virtuelle c'est prendre conscience de l'environnement virtuel et des possibilités d'interaction avec celui-ci. Sanchez-Vives & Slater (2005) défendent alors que la réalité virtuelle est un outil crucial pour l'investigation de la conscience, car cette conscience de soi (en modifiant la représentation virtuelle du corps) ou de l'environnement (en modifiant l'environnement virtuel) peut être altérée de façon expérimentalement contrôlée. De la même façon, dans un article dont la conclusion prône la réalité virtuelle et son sentiment de présence pour l'évaluation empirique des études sur la conscience, Seth et al., (2011) proposent en effet que « presence can be considered as a constitutive property of conscious experience ».

Un concept pouvant éclairer plus en détail la relation entre conscience et présence est celui du *self-awareness*. La distinction, inexistante en français entre *awareness* et *consciousness*, est pourtant intéressante. Pour certains auteurs, *consciousness* correspond au traitement de données issues de l'environnement dans le but de produire une réponse adaptée (A. Morin, 2011) : la grande majorité des animaux sont, à ce titre, conscients (Edelman & Seth, 2009). A l'inverse, l'état d'inconscience correspond à l'arrêt du traitement de l'information extérieure. Le *self-awareness* correspond alors à la capacité à devenir l'objet de sa propre attention (Duval & Wicklund,

1972), et le *meta self-awareness* à la capacité à en être conscient. Ces deux définitions peuvent, à certains égards, se rapprocher de la *core consciousness* et de la *extended consciousness* de Damasio évoquées précédemment (1998), mais aussi des niveaux de présence de Riva & Waterworth (2003) : *proto* et *core presence* correspondant à la *consciousness* alors que *extended presence* correspond au *self-awareness* en réalité virtuelle. A ce titre, Muratore et collègues - dont Riva - (2019) proposent la réalité virtuelle comme objet d'évaluation du *self-awareness*, endommagé lors de certaines pathologies psychiques. Rapprocher la conscience du sentiment de présence ne peut cependant se faire sans analyser un des autres points soulevés par Damasio dans sa définition : « the sense that the stimulus is owned » (1998). Cette possession des informations du monde extérieur peut être considérée comme une forme de présence (le sujet est présent dans l'environnement qu'il fait sien par son interaction), mais aussi et surtout comme un sentiment continu d'incarnation du corps.

2.2.3.3. Présence et sentiment d'incarnation

Le sentiment d'incarnation, plus connu sous le nom anglais *embodiment*, fait partie des domaines d'étude pour lesquels la réalité virtuelle brille. Plus encore, ce concept, lui aussi transdisciplinaire, est étroitement lié aux notions de présence et de conscience, et est parfois assimilé au *bodily-awareness* (Kilteni et al., 2012). Il est défini par Kilteni et al. (2012) comme « Sense of Embodiment toward a body B is the sense that emerges when B's properties are processed as if they were the properties of one's own biological body ». Ce sentiment peut être plus justement appréhendé via l'expérience de la *rubber hand* : le participant est assis à une table, avec le bras gauche posé sur celle-ci. Une main gauche en plastique est également posée sur la table, alignée à côté de la vraie. Un écran cache aux yeux du participant la vision de sa vraie main gauche. Puis, des stimulations tactiles simultanées sur la vraie main et sur la main gauche sont réalisées sur les mêmes positions relatives. Après quelques secondes de ces stimulations synchronisées identiques, le participant développe une illusion de possession, comme si la main en plastique posée devant lui était la sienne. Cette illusion est connue sous le nom de *rubber hand illusion* (Botvinick & Cohen, 1998), et a donné lieu à de nombreuses recherches sur le sentiment d'incarnation – le fait d'avoir et de posséder un corps – ainsi que sur la conscience du corps, largement dépendante de la vision (Blanke et al., 2015; Botvinick & Cohen, 1998; Montes, 2018). Une autre expérience canonique est celle du transfert de corps : par différents techniques et processus similaires à celle de la main en plastique, notamment de synchronisation des informations visuelles et tactiles, il est possible de créer une illusion de transfert. Par exemple faire croire à un participant homme que le corps de femme qu'il a sous les yeux est effectivement le sien (Slater, Spanlang, Sanchez-

Vives, et al., 2010). Dans les théories écologiques, le sentiment d'incarnation est central, car comme nous l'avons évoqué précédemment la cognition elle-même est considérée comme incarnée et non purement rationnelle (Varela et al., 1992). Certains résultats empiriques semblent d'ailleurs donner raison à l'importance de cette incarnation et à la présence comme changement de point de vue : des auteurs ont par exemple montré qu'incarner virtuellement Albert Einstein augmente les capacités cognitives des participants alors qu'incarner un corps de couleur de peau plus foncée diminue les biais racistes (Banakou et al., 2016, 2018). Les liens entre *embodiment*, conscience de soi, conscience du corps et de l'environnement et sentiment de présence sont donc intenses : peu importe la définition de la présence adoptée et le cadre théorique utilisé ; être là, ou avoir conscience de son environnement nécessite généralement une forme ou une autre d'incarnation. Cependant, la relation entre les deux concepts n'est pas des plus simples, et il est impossible de savoir si l'un des deux est la cause de l'autre, ni s'ils se superposent en partie ou totalement. Il est envisageable de considérer que le participant chez qui l'on vient de créer l'illusion de possession d'un corps est présent dans ce nouveau corps, mais il est tout aussi concevable de considérer qu'au contraire c'est cette sensation d'incarner le corps qui lui permet de se sentir présent dans l'environnement. Ces questions n'ont pas de réponse arrêtée, mais il n'y a pas de doute que la réalité virtuelle semble être l'outil idéal pour tenter d'apporter des éclaircissements, par exemple en lien avec les affordances (Tosi et al., 2020).

2.2.3.4. Présence et sentiment d'agentivité

Le dernier concept de la définition de Damasio (1998) énoncé comme « *last but not least* », et souvent considéré comme nécessaire à l'émergence de la conscience de soi est celui de l'agentivité (*agency*). Le *sense of agency* ou sentiment d'agentivité est également largement associé au sentiment de présence et au sentiment d'incarnation. Le sentiment d'agentivité peut être défini comme le sentiment de contrôle sur les actions que le sujet réalise sur l'environnement et sur les conséquences de celles-ci (J. W. Moore, 2016). Ce sentiment fait partie intégrante de l'expérience normale et quotidienne du sujet, au point qu'il peut apparaître comme difficile à conscientiser ou évaluer. Cependant, les situations où il est altéré, comme par exemple dans le cas de la schizophrénie (Synofzik et al., 2010), permettent d'en évaluer l'impact. Le modèle du codage prédictif de la présence de Seth et al. (2011) est par exemple divisé en deux composants respectant les mêmes processus : le sentiment de présence d'un côté et le sentiment d'*agency* de l'autre. Les auteurs considèrent que sentiment de présence et sentiment d'agentivité sont connectés : « they are neither necessary nor sufficient for each other », ce qui semble corroboré par le fait que les apparitions de leurs altérations sont souvent concomitantes dans les troubles mentaux (Seth et

al., 2011), mais aussi par le fait que les possibilités de contrôle de l'interaction en réalité virtuelle augmentent le sentiment de présence (Gutiérrez-Martínez et al., 2011) et que les interactions sensorimotrices augmentent le sentiment d'agentivité (Kong et al., 2017). Seth et al. (2011) proposent que sentiments de présence et d'agentivité forment un composant clé de la conscience de soi. Le sentiment d'agentivité est également très largement associé au sentiment de *embodiment* présenté précédemment. Si le premier peut être défini, nous l'avons vu, comme le sentiment d'incarnation du ou d'un corps, le deuxième correspond au sentiment de contrôle de celui-ci ainsi que des actions qu'il opère (Braun et al., 2018) ; il apparaît donc que les deux sont, si ce n'est proches, au moins indissociables : incarner un corps (*embodiment*) c'est avoir une sensation de contrôle dessus (*agency*), et avoir le contrôle c'est le contrôler quelque part, par rapport à quelque chose (*presence*). Certains auteurs considèrent d'ailleurs le *body-ownership* et le sentiment d'agentivité comme des sous-composants du sentiment d'incarnation, aux côtés du sentiment de *self-location* (Borrego et al., 2019). D'autres auteurs, dans un ouvrage au nom évocateur de *Owning a Body + Moving a Body = me ?* (Pia et al., 2019) considèrent que la conscience de soi est composée des trois unités suivantes : *embodiment*, *agency* et *presence*. Cette taxonomie semble faire consensus dans le domaine (Pritchard et al., 2016), même si ces associations ne sont pas toujours retrouvées empiriquement. Borrego et al. (2019) n'ont par exemple trouvé aucune association entre sentiment de présence, sentiment d'agentivité et performance lors d'une tâche virtuelle de golf. Mais d'autres auteurs ont trouvé des associations communes en se focalisant sur les informations sensorielles impactant chacune des trois dimensions (*embodiment*, *agency*, *presence*) lors d'une tâche de *rubber hand* virtuelle (Pritchard et al., 2016).

2.2.3.5. Présence, attention et flow

Le concept d'attention regroupe de nombreux processus cognitifs souvent regroupés sous le nom de processus attentionnels (LaBerge, 1995). Il a été défini classiquement par William James il y a plus d'un siècle de cela (James, 1890) :

[Attention] is the taking possession by the mind, in clear and vivid form, of one out of what seem several simultaneously possible objects or trains of thought. Focalization, concentration, of consciousness are of its essence.

Il s'agit donc de la faculté de l'esprit, ou de la conscience, à se consacrer à un objet. Dans le cadre cognitif et rationnel qui l'a vu naître, on considère que le concept d'attention permet la formation d'une représentation mentale qui va occuper la conscience et donc permettre une activité réflexive (Sieroff, 2008). Cette attention peut être endogène, aussi appelée *top-bottom* (le sujet dirigeant lui-même son attention vers un stimulus) ou exogène, aussi appelée *bottom-top* (l'attention du

sujet est attirée par un stimulus extérieur). Elle est généralement divisée en plusieurs composants : contrôle, intensité, sélectivité. Au sein de l'intensité, plusieurs niveaux sont dégagés : l'état d'alerte, l'état de vigilance et l'attention soutenue (Knudsen, 2007; Sieroff, 2008). La sélectivité, soutenue par le contrôle attentionnel, permet quant à elle de choisir les informations à conscientiser parmi toutes celles disponibles. L'attention est généralement considérée comme exclusive, c'est-à-dire qu'un seul item peut en être l'objet en même temps (en situation de double-tâche le sujet alterne très rapidement son attention d'un objet à l'autre), et limitée : il s'agit du concept de ressources attentionnelles (Blanchet, 2015; Navon & Gopher, 1979).

Les ressources attentionnelles permettent et modulent le maintien de cette attention et de ses composants. Des processus largement automatisés (par exemple la conduite) peuvent être réalisés avec une allocation faible de ressources attentionnelles, alors qu'une situation complexe de double-tâche ou un problème nouveau demanderont pour être résolus une forte allocation de ressources attentionnelles. Certains auteurs parlent d'économie de l'attention (Navon & Gopher, 1979). Une approche incarnée de l'attention existe également, même si elle est largement moins développée que l'approche cognitiviste, quand elle n'est pas complètement délaissée (D'Angelo, 2019). En effet, les représentations n'étant pas existantes dans ce cadre théorique, la prise en compte de l'attention comme sélection des représentations ou prise de conscience des représentations ne peut être pertinente. Pour ces auteurs, l'attention doit être comprise dans le cadre de la perception sensorimotrice (O'Regan & Noë, 2001), bien qu'aucun modèle n'existe. D'Angelo (2019) dans son article plaidant pour une phénoménologie de l'attention incarnée, la présente ainsi « my claim is that the body is necessary for attentive experience ». Il s'appuie par exemple sur le fait que les réseaux neuronaux moteurs sont impliqués dans l'attention (Knudsen, 2007), ou encore que celle-ci dépend largement des mouvements oculaires et de leur intégration (Grosbras et al., 2005). Quoi qu'il en soit, s'il est une donnée jamais contestée c'est que l'attention et la conscience entretiennent une relation privilégiée.

La relation attention-conscience fait l'objet de profonds débats et de longues recherches, que ce soit dans les domaines de la philosophie ou de la psychologie. Cette exploration est à la fois ancienne et perpétuellement pertinente, car – au-delà des études sur le sentiment de présence – cette relation présente des applications dans des domaines allant de la santé mentale et des troubles de la conscience jusqu'à l'intelligence artificielle. De façon instinctive, il semble que lorsque nous accordons de l'attention à un objet (lorsque nous allouons des ressources attentionnelles, dans un cadre cognitif), nous devenons conscients de cet objet. Si cette attention est soudainement attirée par un stimulus extérieur, alors l'objet en question semble disparaître de notre

conscience. Cette relation est la raison pour laquelle de nombreux chercheurs considèrent les deux concepts comme entremêlés, voire identiques (Marchetti, 2012; Posner, 1994), alors que d'autres considèrent qu'il s'agit de phénomènes distincts soutenus par des réseaux neuronaux différents (Dehaene et al., 2006; Koch et al., 2008; Van Boxtel et al., 2010). Les deux questions centrales, aujourd'hui sans réponse, sont celles de la nécessité et de la suffisance ; l'attention est-elle suffisante pour faire émerger la conscience, et lui est-elle nécessaire (Van Boxtel et al., 2010) ? La question de la relation attention-conscience, bien que passionnante n'étant pas l'objet de cette thèse (elle mériterait, pour être analysée en détail, un travail doctoral dédié), le lecteur est invité à consulter les travaux de Dehaene et al. (2006), de Koch et al. (2008) ainsi que de Pitts et al. (2018) pour des analyses plus approfondies. Sans prendre parti sur leur nature dissociée ou non, il est convenable de statuer qu'elles entretiennent à minima une relation particulièrement intime dans laquelle pourrait se glisser le sentiment de présence.

En effet, sentiment de présence et attention sont souvent évoqués comme entretenant eux-mêmes une relation proche (Draper et al., 1998; Loomis, 1992; Riley et al., 2004). Ces deux concepts sont parfois regroupés sous le terme d'engagement (Witmer & Singer, 1998) qui semble relativement confondu dans celui d'attention : l'engagement n'est-il pas une allocation d'attention basée sur un facteur émotionnel ou cognitif endogène ? Instinctivement chacun peut témoigner que l'on se sent présent là où se porte notre attention ; par exemple lorsqu'immergé dans un bon livre nous n'entendons pas une phrase qui nous est adressée. Mais plutôt que de ne pas l'entendre, il faudrait plutôt considérer que l'on inhibe cette interpellation (attention sélective, engagement) du fait du sentiment de présence dans l'histoire qui nous est racontée. Finalement, nous retrouvons les mêmes interrogations que vis-à-vis du concept de conscience : l'attention est-elle nécessaire à l'émergence du sentiment de présence, et est-elle suffisante ? Dans un modèle de la présence, Draper et al. (1998) considèrent que celle-ci correspond au ratio des ressources attentionnelles dirigées vers l'environnement virtuel par rapport à l'ensemble des ressources attentionnelles disponibles. Dans ce cas, soutenu par d'autres chercheurs (Bystrom et al., 1999), la présence est considérée comme de l'attention pure, dirigée vers un environnement. Les premiers auteurs définissent même la présence comme « the state arising from commitment of attentional resources to the computer-mediated environment » (Draper et al., 1998). Néanmoins, si l'attention semble en effet nécessaire à l'émergence du sentiment de présence, il est discutable qu'elle soit suffisante. Il est contestable que fermer les yeux et penser au nombre 2000 – soit engager ses ressources attentionnelles de façon à le posséder consciemment – nous fasse nous sentir présent dans cette représentation. Par contre, il est plus probable que faire la même chose avec l'an 2000 fasse émerger, à un certain degré, un sentiment de présence dans la situation du passage à l'an

2000, par exemple en remémorant des lieux ou des personnes associées au changement de millénaire. L'attention semble donc nécessaire, mais pas suffisante ; d'autres processus doivent être pris en compte, par exemple les concepts évoqués précédemment (sentiments d'incarnation et d'agentivité, tous deux existants lorsque l'on pense à un souvenir épisodique), ou encore tout simplement des propriétés issues de l'environnement qui nous font le percevoir comme tel : comme un lieu où l'on peut être là. Dans ce cadre, la présence pourrait être considérée comme un concept transversal émergeant des relations entre perception de l'environnement, attention-conscience, sentiments d'incarnation et agentivité, c'est-à-dire, de l'interaction active entre le sujet et son milieu.

Il convient de présenter un dernier concept annexe très couramment associé au sentiment de présence et issu du domaine de l'attention : le *flow*. Le *flow* est un état de conscience qui émerge lorsqu'un sujet est tellement concentré dans une tâche qu'il devient inconscient des stimulations en dehors de cette même tâche, incluant la perception du soi et du temps (Csikszentmihalyi, 1975). Les caractéristiques du *flow* telles que décrites dans (Nakamura & Csikszentmihalyi, 2009) sont :

- Intense and focused concentration on what one is doing in the present moment
- Merging of action and awareness
- Loss of reflective self-consciousness [...]
- A sense that one can control one's action [...]
- Distortion of temporal experience [...]
- Experience of the activity as intrinsically rewarding, such that often the end goal is just an excuse for the process.

Suite à cette description détaillée (notons le point de « merging of action and awareness » qui semble inscrire ce concept dans un cadre écologique), le *flow* peut être défini comme « the experience of total immersion in performing an activity » (Jackson & Roberts, 1992), ce qui semble le rapprocher considérablement du sentiment de présence. Certains auteurs suggèrent d'ailleurs que le sentiment de présence pourrait n'être qu'une expérience de *flow* durant une expérience virtuelle, les deux partageant une grande dépendance aux ressources attentionnelles, que ce soit dans le contrôle, l'intensité ou la sélectivité (Draper et al., 1998). Deux différences entre les deux concepts sont soulevées par les auteurs et les thèses qu'ils discutent (Fontaine, dans Draper et al., 1998). Tout d'abord ils considèrent le *flow* comme étroitement orienté vers une tâche, alors que le sentiment de présence serait plus diffus. De plus, ils considèrent qu'un sentiment de contrôle est nécessaire à l'émergence du *flow*, mais pas à celui de présence (Fontaine, dans Draper et al., 1998). Ces deux points sont discutables. Tout d'abord le caractère précis de la tâche n'est

pas mentionné de façon aussi stricte dans les caractéristiques du *flow* de Nakamura & Csikszentmihalyi (2009), où l'activité est considérée comme « what one is doing in the present moment », seule est focalisée l'orientation de l'attention vers cette activité au sens où elle est presque exclusivement dirigée dans ce sens. Ensuite, il n'est pas certain que le sentiment de présence puisse émerger en absence totale de sentiment de contrôle : cette absence n'est jamais totale, et même dans un environnement sans capture du mouvement, le sujet reste libre de regarder là où il le veut, engendrant une forme de contrôle sur l'environnement. De plus, un auteur gibsonien pourrait considérer que ce n'est pas le contrôle réel de l'individu qui compte, mais le contrôle perçu dans son interaction. Une chaise virtuelle, même si le code informatique ne lui prédestine aucune possibilité d'interaction, pourrait être perçue par le sujet, s'il est libre d'y porter son contrôle attentionnel, comme un moyen d'interaction sur son monde. Enfin, et comme le disent Draper et al. (1998), il existe de nombreuses études mettant en avant l'interaction comme facteur émergent du sentiment de présence. Pour tous ces arguments, il semble difficile de pouvoir dire avec certitude que *flow* et présence sont des processus tout à fait distincts. Cette distinction, ou plutôt cette non-distinction, doit être gardée à l'esprit, notamment en considérant la forte relation qui unit le *flow* et la performance dont la relation avec le sentiment de présence est l'objet expérimental de cette thèse.

2.2.3.6. Présence et rêves

Pillai et al. (2013) présentent un modèle de la présence appelé *evoked presence* et inséré dans un modèle de la réalité physique intitulé *evoked reality*. Ils définissent la réalité évoquée comme une illusion de la réalité primaire, et la présence évoquée comme son expérience spatiotemporelle. Ce concept permet de faire une distinction entre *media-Evoked reality* engendrée par l'immersion virtuelle et *self-Evoked reality*, une expérience perceptuelle générée intérieurement et psychologiquement. Cette conception est largement inspirée des travaux de T. Kim & Biocca (1997) qui considèrent qu'il existe trois possibilités de présence, une présence distale immédiate issue de l'environnement physique premier, une présence distale médiée issue de l'environnement virtuel, et une présence imaginaire caractérisée par une attention réduite aux stimuli distaux et l'absence d'entrées sensorielles. Cette conception donnera lieu à un modèle à trois dimensions (Biocca, 2003) constitué de la *mental imagery space*, du *virtual space* et du *physical space*, et destiné à résoudre le problème de la présence ressentie en dehors de cadres perceptuels comme la lecture d'un livre, l'imaginaire ou encore les rêves. La question du sentiment de présence ressenti sans immersion perceptuelle (rêves, lectures, songeries) est en effet une question récurrente de la littérature à laquelle Pillai et al. (2013) proposent une réponse avec la conceptualisation

d'une présence évoquée personnelle. Dans un cadre rapprochant expérience de présence et conscience, les rêves peuvent être considérés et étudiés comme les plus anciens des environnements virtuels, au sens où il s'agit d'être présent (et, à un certain degré, conscient) dans un autre environnement que la réalité première. K. M. Lee, (2004) distingue lui aussi, pour répondre à ce problème, trois types d'expériences humaines : la *real experience*, qui correspond à l'expérience sensorielle d'objets réels, la *virtual experience*, qui correspond à l'expérience sensorielle ou non sensorielle d'objets artificiels, et *hallucination*, qui correspond à l'expérience non-sensorielle d'objets imaginaires. Dans ce cadre, les rêves seraient plus proches des hallucinations. Hobson et al. (2014) proposent une hypothèse explicative et fonctionnelle des similarités entre ces différentes expériences : ils considèrent un modèle onirique dans lequel le cerveau humain est équipé d'un générateur de réalité virtuelle supporté neurobiologiquement et qui lui permet de s'entraîner à la prédiction et vérification d'hypothèses computationnelles. L'étude comparée du sentiment de présence onirique et du sentiment de présence en réalité virtuelle a donné lieu à de nombreuses analyses dont les interprétations théoriques donnent souvent pour point de jonction la conscience (Moller & Barbera, 2009; Revonsuo, 1995, 2006; Younes & Lioret, 2017).

2.2.3.7. Présence et mémoires

La relation conscience - mémoires a fait et continue de faire l'objet de nombreux débats en sciences cognitives et en philosophie. La plupart des taxonomies de la mémoire distinguent d'ailleurs la mémoire implicite, inconsciente, incluant par exemple la mémoire procédurale ou la mémoire sensorielle, de la mémoire explicite, consciente, incluant généralement mémoire de travail, mémoire épisodique et mémoire sémantique (Anderson, 2013; Atkinson & Shiffrin, 1971; Baddeley, 2007; Dennett, 2010; Persuh et al., 2018; Tulving, 1985). La relation entre conscience et mémoire épisodique (l'encodage et rappel d'information mêlant indices temporels et spatiaux pour créer les souvenirs vécus) est notamment constitutive, car il est possible d'affirmer que l'action de se souvenir d'un événement est en soi une expérience de conscience : « To remember an event means to be consciously aware now of something that happened on a earlier occasion » (Tulving, 1985). Ce constat est à la base de nombreux raisonnements et études sur les liens entre conscience et mémoire épisodique qui partagent à la fois des processus phénoménologiques mais aussi neuronaux, notamment via l'hippocampe (Behrendt, 2013a, 2013b; J. D. Johnson, 2004; Keppler, 2020; Tulving, 1985). Cependant, la relation entre conscience et mémoires ne s'arrête pas à la mémoire épisodique : même une forme largement implicite de la mémoire comme la mémoire procédurale (la mémoire de geste) va impacter – indirectement – l'expérience consciente, par exemple lorsque l'individu est confronté à une tâche et que de la réalisation de cette

tâche dépendent d'autres événements. De la même façon, la mémoire de travail participe à la sélection des informations utilisées pour représenter l'environnement (dont les informations sensorielles sont stockées par la mémoire du même nom), participant ainsi à l'émergence et la modulation de l'expérience phénoménologique consciente du sujet. Enfin, les informations de la mémoire à long terme vont largement impacter l'expérience consciente : deux individus confrontés à un même objet ne vont pas interagir avec cet objet de la même façon selon les connaissances et expériences préalables qu'ils en ont. Cette relation est à double sens, puisque c'est l'expérience consciente du sujet qui va créer et modifier les différentes formes de mémoire, même implicites. Si l'on considère à présent le sentiment de présence comme la conscience d'être dans un environnement (même virtuel), alors cette intrication entre mémoires et conscience peut largement s'appliquer entre mémoires et sentiment de présence. En effet, non seulement les processus habituels de la présence dépendent en grande partie des expériences passées et des capacités à sélectionner l'information, mais son évaluation est une évaluation mnésique. Lorsqu'un chercheur tente d'évaluer le niveau de présence d'un individu plongé dans un environnement virtuel, c'est presque toujours le souvenir épisodique de l'expérience phénoménologique qui est réellement évalué (par exemple avec des questionnaires post facto). Le sentiment de présence peut ainsi être considéré en réalité virtuelle comme le socle de construction de la mémoire épisodique (Schacter & Addis, 2007), dont les échanges continus permettent apprentissage, modulation et altération. Cette hypothèse est soutenue par le fait que des chercheurs ont révélé un effet facilitateur du sentiment de présence sur la performance de mémoire épisodique (Makowski et al., 2017). Ce n'est pas sans raison que la réalité virtuelle est, nous l'avons vu, défendue par de nombreux auteurs comme un outil de choix pour l'évaluation écologique de la mémoire épisodique (Abichou et al., 2017; Plancher et al., 2012, 2013).

2.2.4. Propriétés et taxonomies

Maintenant que nous avons présenté les différentes théories ainsi que les concepts voisins soutenant et échangeant avec le sentiment de présence, il convient d'analyser plus en détail ce phénomène. Tout d'abord, il est nécessaire de rendre compte de la nature dynamique du sentiment de présence et donc de son rapport au temps. Puis, nous présenterons différents composants ou sous-composants du sentiment de présence.

2.2.4.1. La présence dans le temps

2.2.4.1.1. Nature dynamique de la présence

Une de propriétés à définir concernant le sentiment de présence en réalité virtuelle relève de sa nature ; est-ce un phénomène continu ou est-ce un phénomène dichotomique ? Explicitement, il s'agit de déterminer si le sujet immergé dans un environnement virtuel ne sera toujours présent que dans un des deux environnements à la fois – le monde réel ou le monde virtuel – ou s'il est possible de superposer deux sentiments de présence. La conceptualisation de l'attention actuelle en faisant un processus exclusif, soit un processus ne pouvant traiter qu'un seul objet à la fois (LaBerge, 1995), il est courant de considérer la présence comme un phénomène dichotomique, le sujet étant, à chaque moment, soit présent dans l'environnement virtuel soit présent dans l'environnement physique. Cette position est celle de Mestre et al. (2006) dans le *Traité de la Réalité Virtuelle*, où les auteurs considèrent le sentiment de présence comme un phénomène bistable, un système avec deux états stables à l'instar d'un interrupteur électrique (fermé ou ouvert). C'est aussi celle de T. Kim & Biocca (1997) lorsqu'ils précisent qu'un sujet ne peut être présent que dans un des trois environnements suivants à la fois : dans l'environnement physique (présence distale immédiate), dans l'environnement médié (présence distale médiée) ou dans un environnement imaginaire (attention réduite aux stimuli distaux). Cette vue, largement répandue (Wirth et al., 2007), soulève cependant certaines questions compte tenu du caractère dynamique du phénomène, comme le soulèvent Mestre et al. (2006) quelques paragraphes plus loin : « [La Présence] prend donc en compte les deux mondes, et doit alors être définie comme un concept dynamique par nature ». Si l'on conçoit bien que l'attention puisse alterner très rapidement d'une représentation mentale à une autre, et ce alors même que ces objets sont très différents (exemple : guerre, salsifis), il semble instinctivement plus compliqué de faire émerger un sentiment de présence sans une continuité dans l'interaction (même limitée) avec celui-ci. Si l'on considère qu'un sujet immergé sur une plage virtuelle avec qui nous entretenons depuis l'environnement physique une discussion alterne très rapidement entre un sentiment de présence dans l'environnement virtuel (la plage) et dans l'environnement physique (le bureau où se tient la conversation), alors il est possible de considérer que le sentiment de présence ne nécessite pas de continuité pour émerger ni pour se maintenir puisqu'il est fragmenté. Pour l'exercice de pensée, nous pourrions extrapoler et considérer qu'une représentation de l'environnement extraite à un moment précis serait suffisante pour procurer un sentiment de présence, ce qu'aucun auteur ne soutiendra. Il serait toutefois possible d'argumenter que l'illusion neurobiologique de continuité permet de pallier à cette fracturation du sentiment de présence (Berliner & Cohen, 2011). Slater

& Steed (2000) prennent par exemple moins de risques et suggèrent cet état sans énoncer clairement la fracturation : « At each moment of time the individual will tend towards one [environment] rather than the other ». Dans le cadre de la conversation entre la plage et le bureau, le sujet maintiendrait alors deux représentations internes, deux sentiments de présence parallèles, mais alternerait de l'un à l'autre. Il convient de noter que ces deux représentations doivent être mises à jour pour subsister (Carriedo et al., 2016); si pendant la conversation et grâce au son de la voix de l'interlocuteur le sujet peut convenablement estimer la place respective de chacun dans l'environnement physique réel, en cas de silence prolongé il y a fort à parier que cette capacité disparaîtra de la mémoire de travail au profit d'informations virtuelles. De plus, considérant le caractère limité des ressources attentionnelles, il convient de noter que le maintien de deux potentiels environnements de présence serait plus coûteux, et donc que le sujet serait in fine moins présent dans chacun des environnements (Bystrom et al., 1999; Draper et al., 1998). Les études empiriques sur la nature dynamique du sentiment de présence manquent cruellement. Il serait par exemple intéressant, pour ne pas dire fondamental, d'estimer la durée minimale de continuité d'interaction dans l'environnement virtuel nécessaire pour faire émerger le sentiment de présence.

2.2.4.1.2. Début et fin de présence

Deux instants emblématiques de la réalité virtuelle connus par tous les praticiens peuvent être suggérés comme jouant un rôle particulier sur le sentiment de présence : l'arrivée dans l'environnement virtuel – le moment de l'émergence du sentiment de présence – mais surtout la sortie de celui-ci. Généralement accompagnés par des gestes symboliques forts (se mettre un casque sur les yeux, puis l'enlever), ces deux moments ne sont pas à notre connaissance étudiés dans la littérature. Il est pourtant fortement possible que l'effet de contraste, que ce soit par redirection des ressources attentionnelles ou perception d'affordances différentes, joue un rôle important dans la conceptualisation mentale du sentiment de présence. Comme le disent T. Kim & Biocca (1997) :

We have been present in this environment [physical world] for so long and it is so natural that the idea that presence might be a psychological construct is usually only raised by philosophers and perceptual psychologists.

Cette construction de la réalité, habituellement invisible, est en effet conscientisée par son changement, notamment lorsque l'expérience virtuelle s'arrête et que le participant est invité à retourner dans la réalité physique. Cette déconstruction et reconstruction psychologique de la présence pourraient probablement être étudiées plus en détail, par des méthodes qualitatives ou quantitatives en examinant plus précisément ces deux moments. Lanier (2017) décrit à ce titre une expérience particulièrement intrigante qui est celle de s'endormir puis de se réveiller en réalité virtuelle ;

or il n'est pas impensable de considérer la transition sommeil-veille comme une forme de reconstruction de la présence physique. Celle-ci, largement facilitée par le réveil dans un environnement familier serait profondément bouleversée lors d'une situation virtuelle, comme cela peut arriver, à un degré moindre, lors d'un réveil dans un environnement physique non familier.

Slater & Steed (2000), probablement inspirés des notions de *arrival* et *departure* de T. Kim & Biocca (1997), se sont intéressés aux moments de rupture de la présence (*Breaks in Presence* ou *BIPs*). Il s'agit des moments où, bien qu'immergé dans l'environnement virtuel, le sujet ne s'y sent plus présent. Les raisons de ces ruptures peuvent être multiples et provenir soit de l'environnement virtuel soit de l'environnement physique : apparition de bugs visuels ou problèmes d'interaction avec l'environnement, ou encore stimuli perceptifs exogènes (bruits de voiture alors que le participant est immergé à la plage) ou endogènes (cybermalaises). Comme le notent les auteurs il serait contre-productif de demander au participant d'énoncer en continu les moments de « rupture » de présence, bien que ce soit la façon dont ils investiguent le phénomène dans leur étude. Cette même étude leur permet tout de même de trouver des corrélations entre ruptures (nombre, fréquence) et sentiment global de présence dans un environnement virtuel. En admettant que l'émergence et le maintien du sentiment de présence dépendent de la relation entre les informations reçues continuellement et la représentation interne du participant (Wirth et al., 2007), alors il est possible de considérer que les *BIPs* apparaissent en même temps que des incohérences entre ces deux composants. Entendre et reconnaître le son d'une voiture alors que l'on se sent physiquement dans un lieu où elles n'existent pas constitue une incohérence entre la représentation mentale et les boucles sensorimotrices, provoquant une potentielle rupture. Les *BIPs* peuvent être provoqués expérimentalement, par exemple en faisant chuter le taux de rafraîchissement de l'image, en supprimant momentanément le son ou encore en inversant pour une courte durée les axes de translation et rotation des moyens d'interaction, comme réalisés par Chung et al. (2010). Ces ruptures de présence provoquées en altérant la qualité de l'interface et donc de l'interaction avec l'environnement n'est pas sans rappeler la métaphore du marteau de Heidegger : la réalité virtuelle revient réellement à l'esprit lorsqu'elle cesse de fonctionner, dévoilant les mécanismes de l'immersion et annihilant ainsi le sentiment de présence. L'étude des *BIPs* est couramment utilisée, nous le verrons, dans le but d'évaluer de façon continue le sentiment de présence (Brogni et al., 2003; Liebold et al., 2017; Rey et al., 2011; Slater et al., 2003; Slater & Steed, 2000).

2.2.4.2. Taxonomies du sentiment de présence

Comme tous les phénomènes relativement complexes et transversaux, le sentiment de présence a été théoriquement divisé en composants ou sous-parties selon les besoins théoriques et empiriques des auteurs, issus eux-mêmes de domaines et disciplines différents. Le but ici est de présenter et de regrouper ceux qui sont considérés, arbitrairement, comme importants ou similaires pour comprendre le concept en son entier et la large gamme de phénomènes qu'il sous-tend.

2.2.4.2.1. La présence spatiale

La présence spatiale correspond à la définition phénoménologique première du « être là » (Heeter, 1992; IJsselsteijn et al., 2000; Steuer, 1992), il s'agit, au-delà d'être le sujet de cette thèse, du phénomène entendu lorsque l'on parle de « sentiment de présence », de « téléprésence » ou encore de « présence ». Qu'il s'agisse d'une définition psychologique intimement liée à la conscience avec la *inner presence* de Riva (Riva & Waterworth, 2003) ou d'une définition technologique telle la *media presence* et l'illusion de non-médiation, il s'agit de la construction de la sensation d'être situé dans un environnement. Elle est parfois appelée *physical presence*, *personal presence*, *sense of physical space*, *perceptual immersion*, *environmental presence*, *ego-presence* ou encore *transportation*. Que la présence spatiale s'applique aux environnements virtuels comme aux environnements physiques (ou imaginaires) n'est cependant pas unanime. Lee (2004, p. 37) définit par exemple la présence comme « a psychological state in which virtual (para-authentic or artificial) objects are experienced as actual objects in either sensory or nonsensory ways ». G. Mantovani & Riva (1999) quant à eux plaident pour une présence spatiale réelle, considérant que les processus en jeu sont identiques dans les deux environnements. Slater (2009) utilise parfois pour parler de la présence spatiale le terme de *place illusion* qu'il différencie de la *plausibility illusion*, qu'il réserve à l'illusion que le scénario décrit se produise réellement. Dans le *Traité de la Réalité Virtuelle*, Mestre et al. (2006) ne parlent pas d'illusion mais de positionnement, ce qui est à rapprocher de la notion de transport : « Elle [la présence] concerne la recherche du positionnement cognitif, perceptif et moteur du sujet ». Draper et al. (1998) utilisent eux le terme de *experiential presence* pour désigner la présence spatiale, qu'ils distinguent de la *simple presence*, le fait d'opérer dans un environnement virtuel, et de la *cybernetic presence* qui correspond aux aspects d'interface de l'interaction homme-machine. Une autre taxonomie de la présence spatiale la différencie du *Involvement*, le degré d'attention et de conscience dans l'environnement virtuel, et du *Realness*, le degré de réalité qu'accorde l'individu à l'environnement virtuel (Schubert et al., 2001). La présence spatiale est souvent considérée comme une construction

bidimensionnelle, la première étant la sensation de lieu et la deuxième la possibilité d'interaction dans ce lieu (Wirth et al., 2007).

Dans ce même article, Wirth et al., (2007) proposent un modèle procédural de la présence (Figure 8). Pour eux, il existe en amont du sentiment de présence spatiale la construction mentale d'une représentation de l'environnement, le *spatial situation model*, construction mentale basée sur les informations spatiales de l'environnement et nécessaire à l'émergence du sentiment de présence. Les auteurs défendent également un sentiment de présence par hypothèses perceptives (Bruner & Postman, 1949) : dans ce cadre, la présence spatiale émergerait de l'évaluation continue du modèle représentationnel interne par rapport aux informations sensorielles entrantes, particulièrement spatiales. Cette conception est à rapprocher de celle de Seth et al. (2011). En s'appuyant sur l'étude des pathologies où la présence et la conscience sont altérées ainsi que sur les neurosciences computationnelles, les auteurs présentent un modèle de la présence comme un système bayésien d'évaluation puis d'élimination des erreurs de prédiction, appelé *predictive coding* (Bubic et al., 2010; Critchley, 2009; Grush, 2004). Dans ce cadre, la présence est considérée comme « the result of successful suppression by top-down predictions of informative interoceptive signals evoked (directly) by autonomic control signals and (indirectly) by bodily responses to afferent sensory signals ». Ce serait cette évaluation continue, si cohérente, qui donnerait lieu à la sensation de présence dans l'environnement.

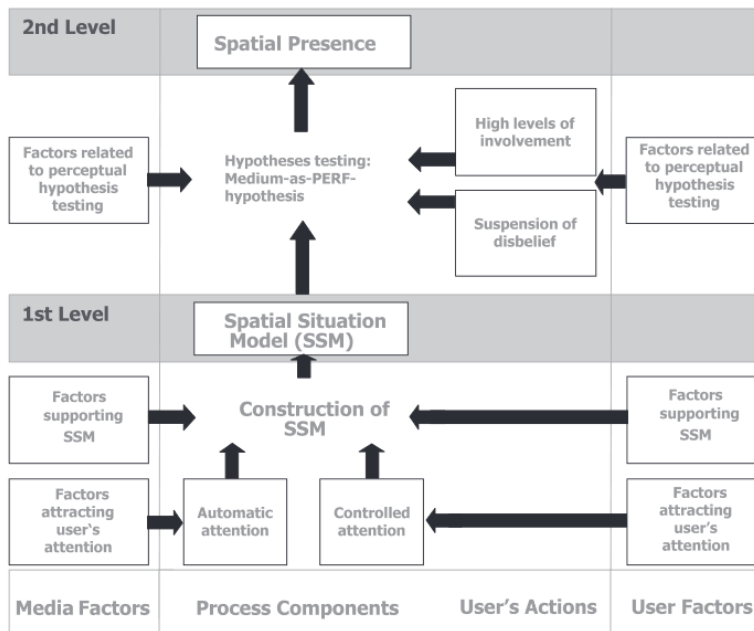


Figure 8. – Visualisation du modèle à deux niveaux de la présence spatiale de Wirth et al. (2007).

2.2.4.2.2. La présence sociale et la coprésence

La présence sociale peut être définie comme « the sense of being with another » (Biocca et al., 2003). Elle est déjà évoquée par Heeter (1992) dans le premier numéro de *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. Il s'agit à l'origine, en psychologie sociale, du « degree of salience of the other person in the interaction and the consequent salience of the interpersonal relationships » (Short et al., 1976). Les auteurs du domaine définissent deux composants principaux de la présence sociale : l'intimité (le sentiment de proximité et d'appartenance ressenti par chacun des sujets) et l'immédiateté (l'importance donnée à l'échange). La communication non verbale ainsi que les propriétés du média permettant l'échange sont également considérées comme de première importance dans la présence sociale (Dixson et al., 2017). La présence sociale est elle aussi à rapprocher de la conscience, car il s'agit à un certain degré d'être conscient de l'autre par sa présence. Pour Biocca et al. (2003) le modèle de la présence spatiale, trop général, ne permet pas de rendre compte, culturellement et neurobiologiquement, de la perception et représentation d'autres êtres sentients. Cet autre qui va créer un sentiment de présence sociale peut être un humain réel, un humain réel incarné par un avatar dans le monde virtuel, ou même des robots virtuels incarnés de façon plus ou moins anthropomorphique (Garau et al., 2003).

La recherche de la présence sociale est le but d'un très grand nombre de technologies quotidiennes modernes : robots et interfaces domestiques (Alexa, Google Home, Siri), télévision, radio, réseaux sociaux... L'origine de la création d'objets ou de l'utilisation de la technologie pour évoquer une présence sociale peut être remontée, comme le sentiment de présence, aux peintures rupestres, à la sculpture ou encore à la photographie. La présence sociale renvoie également aux réponses émotionnelles et comportementales instinctives suscitées par le sentiment d'être en présence d'un autre. L'application de la présence sociale dans l'environnement physique quotidien comme dans un environnement virtuel fait moins débat que la présence spatiale (Biocca et al., 2003). Les termes de coprésence et de présence sociale – bien que le premier soit conceptualisé par Harms & Biocca (2004) comme une des six composantes du second – sont parfois utilisés de façon interchangeable dans la littérature (Kangsoo Kim et al., 2016). La coprésence est définie bien en amont de la téléprésence par Goffman (1959) comme la perception sensorielle d'un autre incarné. Il est généralement considéré que la présence sociale est un phénomène plus large de conscientisation de l'autre, alors que la coprésence correspond plus précisément à la sensation d'être présent au même endroit (Bulu, 2012). La distinction pourrait être comprise comme une différence entre être avec quelqu'un, et être là, avec quelqu'un. Il existe bien évidemment une corrélation entre les deux phénomènes (Schroeder, 2002; Slater et al., 2000). L'exis-

tence du phénomène de présence sociale (qu'elle soit conscientisée ou non par le sujet) est corroborée par de nombreuses études dans de nombreux domaines, que ce soit en psychologie évolutionniste avec des études sur le changement comportemental en présence de l'autre, ou en psychologie sociale (Bailenson et al., 2016; Blascovich et al., 2002; Chekroun & Brauer, 2002; Y. Li & Zhao, 2019; Tamas et al., 2010). Le champ entier de la psychologie sociale s'est d'ailleurs développé sur cette notion de présence de l'autre. Allport, (1985) présente la psychologie sociale comme « the scientific study of how the thoughts, feelings, and behaviors of individuals are influenced by the actual, imagined and implied presence of others ». Une étude révélant simplement et efficacement l'existence de la présence sociale et son impact quotidien sur les comportements individuels est celle de Bateson et al. (2006). Dans cette étude, les auteurs ont montré que la simple présence d'une image d'une paire d'yeux sur une machine à café en libre-service et à prix libre augmente le dépôt moyen d'argent individuel.

Dans le cadre de la réalité virtuelle, les études sur la présence sociale révèlent généralement deux grandes applications. La première correspond à l'émergence d'un sentiment de présence sociale ou de coprésence lorsque deux humains interagissent virtuellement, par exemple sous la forme d'un avatar. Il s'agit alors dans ce cas d'évaluer les critères permettant à chacun des sujets de sentir la présence de l'autre dans ce monde virtuel ainsi que d'évaluer l'impact de celle-ci sur le comportement de chacun des individus (Bulu, 2012). La deuxième application correspond à provoquer un sentiment de présence sociale lorsqu'un être humain interagit avec un agent virtuel, tel qu'un programme informatique représenté de façon plus ou moins anthropomorphique (Nowak & Biocca, 2003), tout en évitant la fameuse vallée étrange, *the uncanny valley* (Mori et al., trad. 2012). La recherche de présence sociale avec des agents virtuels n'est pas sans rappeler le chapitre *The Imitation Game* de Alan Turing (Turing, 1950/2009). Le test de Turing est un test d'intelligence artificielle destinée à évaluer la capacité à imiter la conversation humaine. Dans ce test, un sujet humain est confronté verbalement et de façon aléatoire soit à des humains soit à des ordinateurs. Si le sujet n'est pas capable de dire lequel de ses interlocuteurs est un ordinateur, alors on considère que le programme informatique a passé le test avec succès : il est tout à fait possible d'argumenter que différencier une intelligence artificielle d'un être humain requière une évaluation interne du ressenti de présence sociale. Quoi qu'il en soit, la présence sociale semble cruciallement importante dès lors qu'existe une interaction avec un agent en réalité virtuelle. Elle est par exemple positivement associée à la satisfaction de l'utilisateur lors d'apprentissage (Russo & Benson, 2005), mais surtout elle est au cœur de l'utilisation de la réalité virtuelle en neurosciences sociales (Pan & Hamilton, 2018; Parsons et al., 2017).

2.2.4.2.3. *La présence de soi*

Un sous-composant de la présence évoqué mais relativement peu étudié est celui du *self-presence* ou présence de soi. Ce concept renvoie à « a state in which users experience their virtual self as if it were their actual self, perhaps even leading to an awareness of themselves inside the virtual environment » (Tamborini & Skalski, 2006). Il est généralement utilisé pour décrire les interactions d'un sujet avec son avatar virtuel (Behm-Morawitz, 2013; Jin, 2010; Jin & Park, 2009), le rapprochant largement des concepts d'incarnation ou de conscience de soi décrits précédemment.

2.2.4.2.4. *La présence sexuelle*

Les premiers auteurs à s'intéresser au rapport entretenu entre présence et sexualité et à promouvoir les intérêts scientifiques de cette étude sont à notre connaissance Renaud et al. (2002) ainsi que Lombard & Jones (2004). Ces derniers rappellent à juste titre que la pornographie s'est emparée de tous les médias, de la sculpture à la peinture jusqu'à la réalité virtuelle, dans le but implicite de provoquer une forme de présence sexuelle. Celle-ci est définie par (Fontanesi & Renaud, 2014) comme une « experience of sexuality through immersive means ». Dans cette dernière étude proposant un modèle évolutionniste de la présence sexuelle, les auteurs considèrent que la vue d'autres personnes engagées dans des activités sexuelles devait être une expérience commune de l'environnement humain plio-pleistocène. Inspirés des niveaux de présence de Riva sur la *proto*, *core* et *extended presence* (Giuseppe Riva & Waterworth, 2003), Fontanesi & Renaud (2014) considèrent un modèle à trois niveaux de présence sexuelle, composé d'une *proto presence* consistant en une réponse esthétique et génitale provoquant une augmentation de l'intérêt vers l'objet, d'une *core presence* consistant en une réponse d'approche, notamment corporelle, et d'une *extended presence*, consistant en une évaluation de la motivation pour s'engager dans un rapport sexuel. Le concept de présence sexuelle, que l'on pourrait potentiellement discuter comme sous-composante de la présence sociale puisqu'elle nécessite elle aussi un objet social, est notamment utilisé en psychiatrie pour l'étude des paraphilies (Renaud et al., 2010) ou des addictions sexuelles (Cismaru Inescu et al., 2013), mais aussi en psychologie pour l'études des comportements sexuels (Renaud et al., 2002, 2013).

2.2.4.2.5. *La présence d'objets*

Barfield & Hendrix (1995) utilisent le terme de *ego-presence* pour parler de la présence spatiale afin de la différencier de la présence d'objet, le sentiment que des objets virtuels projetés dans le monde réel existent réellement. La notion de présence d'objets est utilisée de façon quasi exclu-

sive dans des d'environnements peu englobants (tables de projections, environnements haptiques). Hecht & Reiner (2007) la définissent comme l'impression que « the user feels that he can actually touch and manipulate an object that does not exist in the real world ». De façon similaire, Stevens & Jerrams-Smith (2000) la définissent comme « the subjective experience that a particular objet exists in a user's environment, even when that object does not ». Cette forme de présence est généralement évaluée par sélection de certaines catégories du Questionnaire sur l'Etat de Présence (Robillard et al., 2002; B. Stevens et al., 2002; Witmer & Singer, 1998).

2.2.5. Evaluations du sentiment de présence

Le premier numéro de *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* du 1^{er} janvier 1992 fait de nombreuses références au besoin d'évaluations du sentiment de présence (Held & Durlach, 1992; Sheridan, 1992; Steuer, 1992). Steuer (1992) propose même que le taux de présence ressenti dans un environnement virtuel soit une mesure de l'efficacité et de la qualité de ce même environnement, en faisant le point central de la réalité virtuelle. La question de la mesure du sentiment de présence est toujours actuelle, et il n'existe pas aujourd'hui une méthode unanimement reconnue comme fiable dans le domaine. Ces méthodes sont présentées en détail dans cette partie, car évaluer le sentiment de présence est une étape fondamentale dans sa compréhension. Elles sont séparées en deux catégories (mesures subjectives, mesures comportementales) comme c'est le cas dans de nombreuses publications.

2.2.5.1. Les mesures subjectives

L'évaluation subjective est la méthode d'évaluation la plus répandue (Schwind et al., 2019). Questionner la subjectivité du participant semble en effet une évaluation naturelle et pertinente lorsque l'on veut rendre compte d'un phénomène aussi intrinsèquement psychologique que le sentiment de présence. Pour (Steuer, 1992), et dans une approche relativement similaire au test de Turing (Turing, 1950/2009) la présence pourrait être évaluée comme le degré auquel le participant ne différencie pas l'environnement virtuel de l'environnement physique.

2.2.5.1.1. Les questionnaires

La méthode subjective principalement utilisée est celle de l'administration ou auto-administration de questionnaires, généralement réalisés après l'exposition à l'environnement virtuel. Les premiers à utiliser de telles questions sous forme d'échelles de Likert sont Barfield & Weghorst (1993) avec l'utilisation d'un questionnaire à 7 items en lien direct avec l'environnement utilisé. Mais c'est réellement avec Witmer & Singer (1994, 1998) que se développe le premier questionnaire générique de présence, avec 32 items différents et comportant quatre sous-échelles: *Control Factors*,

Sensory Factors, Distraction Factors, Realism Factors. En parallèle, les auteurs développent le *Immersive tendency questionnaire*, créé dans le but d'évaluer a priori la propension à la présence des participants. Ces deux questionnaires seront par la suite validés et traduits en français (Annexe 1) par le Laboratoire de Cyberpsychologie de l'Université du Québec en Outaouais (Robillard et al., 2002). Le questionnaire sur l'état de présence de (Witmer & Singer, 1998) et sa structure factorielle (Witmer et al., 2005) sont actuellement – et de loin – les plus cités dans la littérature (Schwind et al., 2019). Le deuxième questionnaire le plus cité est le Slater-Usoh-Steed (Usoh et al., 2000), qui est lui fondé sur six items comportant des variations autour de trois thèmes : « the sense of being in the virtual environment », « the extent to which the virtual environment becomes the dominant reality », et « the extent to which the virtual environment is remembered as a "place" ». Dans un article empirique portant sur l'utilisation des questionnaires en réalité virtuelle, Usoh et al. (2000) montrent que ni le questionnaire de Witmer & Singer ni le Slater-Usoh-Steed ne permettent de distinguer l'expérience de la réalité virtuelle et celle de la réalité physique. A la différence du questionnaire de Witmer & Singer, il convient de noter que le Slater-Usoh-Steed utilise généralement un item qualitatif « Please write down any further comments that you wish to make about your experience ». Il est généralement considéré que le questionnaire de Witmer & Singer propose une approche de la présence par l'immersion (les questions sont moins explicitement orientées vers le sentiment de présence) alors que celui de Slater-Usoh-Steed propose une approche plus psychologique. Les autres questionnaires utilisés de façon plus ou moins conséquente dans la littérature sont ceux de T. Kim & Biocca (1997), de Lessiter et al., (2001), de Nowak & Biocca, (2003) ou encore de Schubert et al. (2001). D'autres variations de questionnaires existent ou ont existé, comme la notation directe sur 100 du sentiment de présence ressenti (Welch et al., 1996).

Le recours aux questionnaires pour évaluer le sentiment de présence soulève cependant certains problèmes et certaines questions. Tout d'abord, les questionnaires sont à l'origine de biais aussi nombreux que divers ; ils peuvent être inhérents à la formulation du questionnaire, comme c'est le cas des questions complexes ou ambiguës (Choi & Pak, 2004), ou à la subjectivité du participant, avec des biais comme celui de désirabilité sociale incitant le sujet à répondre ce qu'il pense que le chercheur veut trouver (Crowne & Marlowe, 1960). La seconde critique faite au questionnaire est que leur utilisation ne permet pas de rendre compte de la nature dynamique, évoquée précédemment, du phénomène. Il est en effet fort probable que lors d'une immersion d'une dizaine de minutes il existe chez un même sujet de fortes variations du sentiment de présence ressenti. Les questionnaires, évaluant le phénomène global et post facto, ne permettent donc pas de rendre compte de ce dynamisme. De plus, ces questionnaires étant généralement réalisés au format

papier-crayon ou écran d'ordinateur, ils nécessitent la sortie de l'environnement virtuel, ce qui peut également altérer le sentiment de présence. Schwind et al. (2019) suggèrent pour limiter ce biais de réaliser les questionnaires de présence directement dans l'environnement virtuel. Globalement, et bien qu'il ait auparavant participé à l'élaboration de questionnaires de présence, Slater (2004) affirme que ce type de mesures « does not and cannot measure presence » et que le sentiment de présence pourrait émerger pour la simple raison que le chercheur interroge le participant sur cette question. Le sentiment de présence pourrait donc n'être qu'une construction post hoc corrélée à aucune activité neuronale ou comportementale. Pour démontrer cette possibilité, Slater (2004) interroge par questionnaire des participants sur un concept inventé pour l'occasion qu'il nomme la *colorfulness* d'une expérience et montre des régressions significatives avec d'autres aspects comportementaux. Il est toutefois possible d'argumenter tout d'abord que le questionnaire de Witmer & Singer ne comporte aucune allusion directe au sentiment de présence même (Robillard et al., 2002; Witmer & Singer, 1998), et ensuite que même s'il n'existe pas de concept théorique de coloration de l'expérience, les couleurs sont des métaphores de la vie quotidiennes (Lakoff & John, 1980) largement comprises instinctivement par les sujets d'une même culture occidentale (par exemple le blanc, symbolisant la paix et la joie, alors que le noir, symbolise la mort et la tristesse).

2.2.5.1.2. Les ruptures de présence

La principale alternative subjective aux questionnaires est l'utilisation des moments de rupture de présence (*Breaks in Presence, BIPs*) décrits précédemment (Slater & Steed, 2000). Elle consiste généralement à demander aux participants d'énoncer les moments où ils ne se sentent plus présent dans l'environnement, soit pendant, soit après l'immersion. Certains auteurs produisent des *BIPs* expérimentaux, par exemple en ralentissant le taux de rafraîchissement. L'utilisation de ces *BIPs* est toutefois complexe, car elle nécessite pour examiner l'objet de le rompre momentanément, ou, s'il est déjà altéré par l'apparition même du *BIP*, de le rendre encore plus saillant en demandant au participant de l'énoncer à haute voix aux expérimentateurs. Certains auteurs font par exemple une distinction entre un *BIP* partiel, légère altération négative du sentiment de présence, et un *BIP* total, rupture totale du sentiment de présence (Rey et al., 2011). L'étude des *BIPs* semble toutefois pertinente pour rendre compte du sentiment de présence : le nombre de leurs occurrences a été empiriquement testé et semble inversement corrélé au taux de présence rapporté par questionnaire (Brogni et al., 2003). Les facteurs favorisant l'émergence de rupture de présence ont fait l'objet d'études qualitatives par Garau et al (2008) : leurs analyses semblent montrer que les stimuli perçus comme des anomalies sont à l'origine des *BIPs*.

2.2.5.2. Les mesures comportementales

2.2.5.2.1. Analyse comportementale

Le sentiment de présence consistant en une sensation d'être dans l'environnement, une des premières évaluations de celui-ci a été d'observer le comportement du sujet afin d'en évaluer l'adaptation par rapport à l'environnement. Explicité autrement, il s'agit d'évaluer de façon comportementale si le sujet agit en adéquation avec les stimuli qui lui sont présentés. Une des premières études explorant les évaluations comportementales est celle de J. Freeman et al. (2000) dans laquelle les auteurs utilisent les réponses posturales des participants lors d'une course virtuelle de voiture afin d'en déduire leur sentiment de présence. L'idée est qu'un participant plus présent réaliserait davantage d'ajustements posturaux par adaptation au flux visuel. Il est en effet relativement courant d'utiliser des environnements générateurs de comportements particuliers afin de pouvoir en évaluer les réponses adaptatives (Malbos et al., 2012). Un des environnements les plus connus dans ce but est la Pitroom, une salle virtuelle où le sol est effondré sur plusieurs mètres, créant ainsi une sensation (virtuelle) de danger (Meehan et al., 2002). L'idée sous-jacente étant qu'un participant plus présent prendra davantage de précautions en marchant près du précipice qu'un sujet moins présent. Pour évaluer cette notion adaptative, les auteurs ont défini au préalable les comportements attendus et les ont reportés pour chaque participant, corroborant une relation avec les analyses subjectives (Insko, 2003; Meehan, 2001). De la même manière, des auteurs ont utilisé les réponses réflexes des participants face à des stimuli inattendus comme indicateurs de présence, le présumé étant qu'un individu moins présent manifestera des réponses réflexes moins importantes qu'un participant plus présent, par exemple lorsqu'un projectile virtuel lui est lancé (Held & Durlach, 1992; Insko, 2003; Sanchez-Vives & Slater, 2005). Une autre évaluation comportementale est celle de Slater et al. (1995). Dans leur article, les auteurs ont utilisé deux postes de radio, un virtuel et un réel, qu'ils ont spatialement superposés au début de l'expérimentation plus dissociés durant l'immersion. À un certain moment, ils ont demandé au participant de pointer du doigt l'emplacement de la radio ; le présumé étant qu'un individu plus présent pointerait dans la direction de la radio virtuelle alors qu'un participant moins présent saurait indiquer l'emplacement de la radio réelle.

Dans le but d'analyser le comportement de l'individu, un outil régulièrement utilisé en réalité virtuelle est l'oculomètre. Les premiers chercheurs à avoir incorporé l'oculométrie en réalité virtuelle sont à notre connaissance Duchowski et al. (2000), dont les travaux connaîtront de nombreux développements (Duchowski, 2007; Duchowski et al., 2001). Le but de l'oculométrie, comme son nom commun en anglais de *eye tracking* l'indique, est de permettre l'investigation du regard de

l'individu, souvent à l'aide de caméra vidéo ou infra et proche infra-rouge. L'usage en réalité virtuelle est complexifié à cause de l'utilisation du rendu 3D qui ne permet souvent pas de rendre compte de la profondeur du vecteur du regard de l'individu (Duchowski et al., 2002). L'usage de l'oculométrie s'est largement développé dans les années 2000 et 2010, que ce soit en CAVE ou en casques, et ce pour tous types d'étude : coprésence (Garau et al., 2003; H. Kim et al., 2017), présence spatiale (Laarni et al., 2003), présence sexuelle (Renaud et al., 2010). L'oculométrie seule peut difficilement rendre compte du sentiment de présence ; si elle permet de connaître dynamiquement le lieu où le regard du participant se pose (dans ou en dehors de l'environnement virtuel) voire de suggérer des attitudes sur la durée de fixation ou les items regardés, elle ne permet pas d'inférer réellement le sentiment de présence. Elle est donc souvent associée à des mesures autres comme l'électro-encéphalogramme (Boukhalfi et al., 2015) ou encore des mesures physiologiques non cérébrales. Enfin, l'oculométrie peut être discutée comme une forme d'adaptation comportementale à la fois exogène et endogène ; d'un côté, un participant dont l'attention est accaparée par des stimuli à forte saillance attentionnelle exogène (un objet très coloré ou potentiellement dangereux) peut être considéré comme présent dans l'environnement virtuel. De l'autre côté, et parce que l'attention est fortement liée au regard (certains auteurs parlent d'attention visuelle), il peut permettre de réaliser des inférences sur le positionnement attentionnel endogène du participant (Frischen et al., 2007; Massé et al., 2018).

Plus récemment, Ochs et al. (2018) ont utilisé plusieurs indices comportementaux, verbaux et non verbaux, pour créer un système automatique d'évaluation du sentiment de présence. A l'aide de l'apprentissage automatique (*machine learning*) et notamment de la technique de la forêt d'arbres décisionnels (*random forest*) proposée par Ho, (1995), les auteurs ont élaboré deux modèles durant une interaction avec un agent virtuel : un pour l'évaluation de la présence, l'autre pour l'évaluation de la co-présence. Ces deux modèles reposent sur sept composants principaux : la durée totale de l'interaction, l'expertise du participant, l'entropie des mouvements de la tête et des bras, la longueur moyenne des phrases en nombre de mots, la longueur moyenne des silences, la richesse lexicale et la complexité linguistique. Ces modèles, juxtaposés à des questionnaires classiques, ont permis aux auteurs d'arriver à des niveaux de prédiction relativement fiable (en moyenne 80%), et ouvrent la porte à de nombreuses possibilités d'évaluation automatique de la présence. En effet, les systèmes actuels de réalité virtuelle comportent de nombreux capteurs permettant une évaluation dynamique du comportement du participant. Associées à des modèles d'apprentissage, ces nombreuses données pourraient permettre sur le long terme une évaluation pertinente du sentiment de présence de l'individu, et ce sans recourir à des questionnaires a posteriori. En plus de pouvoir évaluer le sentiment de présence de façon dynamique, les mesures

comportementales sont également moins soumises aux biais intra-individuels que les mesures subjectives. Cependant, il existe tout de même un impact de la subjectivité humaine ; celle des juges qui analysent les comportements en question, ou celle de ceux qui réalisent l'apprentissage (ou du moins lui disent où regarder et par rapport à quoi évaluer) dans le cas de l'apprentissage automatique.

2.2.5.2.2. Evaluations physiologiques

Toujours en partant du principe que plus un individu est présent dans l'environnement virtuel plus il réagira comme s'il y était réellement (Kober et al., 2012; Riva et al., 2003), de nombreuses mesures physiologiques sont suggérées comme de potentiels marqueurs de présence. Ces approches de l'évaluation du sentiment de présence reposent très largement sur les mêmes méthodes que celles de l'analyse comportementale décrite précédemment : la sécrétion de corticoïdes face à un stress est bien une réponse comportementale, qui va elle-même avoir un impact sur le comportement de l'individu. Elles sont cependant généralement différenciées dans la littérature, les premières sous le nom d'évaluations comportementales, et les secondes sous le nom d'évaluations physiologiques (Insko, 2003). L'idée est la même que pour les analyses d'adaptation comportementales : le participant est confronté à un environnement déclenchant des réponses automatiques que le chercheur peut ensuite mesurer en les comparant à un niveau basal. Les expérimentations pionnières du domaine sont celles de Meehan (2001) où sont mêlées mesures physiologiques et mesures comportementales. Meehan et al. (2002) ont utilisé la PitRoom et son précipice virtuel pour mesurer les réactions de stress des participants (rythme cardiaque, température de la peau, conductance de la peau) vis-à-vis de la potentielle menace générée par l'environnement. Les auteurs ont révélé des corrélations entre le taux de présence rapporté par l'individu et ces mesures physiologiques, particulièrement l'augmentation du rythme cardiaque, résultats confirmés par la suite (Kwanguk Kim et al., 2012; Peterson et al., 2018; Wiederhold et al., 2003). Les analyses des bio-feedbacks comme le rythme cardiaque ou la conductance de la peau sont généralement associés à d'autres méthodes, comme les questionnaires (Meehan et al., 2002) ou l'électro-encéphalogramme (Peterson et al., 2018). Enfin, et si ces trois mesures révélées par Meehan et al. (2002) sont les plus courantes (à un degré inférieur pour la température de la peau dont la vitesse d'évolution lente rend sa puissance temporelle relativement faible), de nombreux autres bio-feedbacks sont suggérés ou pourraient l'être. Renaud et al. (2013) utilisent par exemple la réponse érectile (plétysmographie) couplée à l'oculométrie et à l'électro-encéphalogramme comme indicateur de présence sexuelle (Renaud et al., 2002, 2003, 2010). D'autres pistes

inexplorées peuvent être suggérées, notamment les réponses hormonales (corticoïdes) qui pourraient se montrer révélatrices du sentiment de présence, particulièrement dans les environnements anxiogènes.

Si les techniques de bio-feedbacks physiologiques semblent à la fois moins subjectives que l'évaluation par questionnaire et moins encombrantes et complexes que les techniques d'imagerie, il convient d'en préciser la limite majeure : des stimuli différents peuvent produire une réponse physiologique identique. Attribuer tout changement dans le rythme cardiaque, la conductance ou la température de la peau à un effet de la présence est dangereux (Insko, 2003). Par exemple, nous observons que lors d'un apprentissage classique ces différentes variables évoluent, probablement sous l'effet d'une régulation émotionnelle (Revelle & Loftus, 1992) ; il convient donc de les manier avec précaution, et de noter temporellement les événements de l'environnement virtuel afin de les synchroniser avec de potentielles variations.

2.2.5.2.3. *Neuro-imageries*

Les techniques de neuro-imageries sont actuellement au cœur des neurosciences (M. S. Schwartz & Andrasik, 2017). Elles permettent d'observer les activations neurologiques associées aux réponses comportementales d'un individu lorsqu'il est confronté à un stimulus ou une situation précis. Ces techniques sont régulièrement évoquées comme de potentielles méthodes d'évaluation du sentiment de présence. Les premiers à avoir utilisé de tels outils sont à notre connaissance Strickland & Chartier (1997) qui ont, à l'aide d'une comparaison entre une analyse d'électro-encéphalographie dans l'environnement virtuel et dans l'environnement réel, prouvé la validité de cette analyse couplée à un casque de réalité virtuelle. Leurs analyses ont montré de larges différences entre les deux environnements, notamment une diminution des ondes Alpha en réalité virtuelle qui pourrait correspondre à un engagement cognitif supérieur face à un nouvel environnement. L'utilisation de l'électro-encéphalographie en réalité virtuelle s'est par la suite largement développée. Baumgartner et al. (2006) ont par exemple évalué l'activité corticale lors d'une tâche de cognition spatiale et ont trouvé – de façon cohérente avec la littérature traitant de la cognition spatiale – une augmentation de cette dernière dans le cortex pariétal. Ils ont également observé une activité frontale différente plus développée chez des enfants plus jeunes et plus présents que chez des adolescents, globalement moins présents. Or, ces aires sont généralement associées au contrôle exécutif dont le développement ne se termine que tardivement, ce que les auteurs suggèrent comme facteur d'un sentiment de présence plus développé. D'autres auteurs ont également retrouvé via des électro-encéphalogrammes une augmentation de l'activité des aires pa-

riétales (Kober et al., 2012; Kober & Neuper, 2013). De plus, ils suggèrent qu'un niveau de présence moins élevé serait associé à une connexion fonctionnelle plus développée entre les aires frontales et pariétales ; leur étude a en effet montré une corrélation positive entre sentiment de présence et activation pariétale, ainsi qu'une corrélation négative entre présence et activation frontale, corroborant l'hypothèse d'un contrôle exécutif frontal diminuant le sentiment de présence et d'une activation pariétale le favorisant. Cette hypothèse est cohérente avec les connaissances psycho-neurologiques : les cortex frontaux et préfrontaux sont largement associés au contrôle exécutif, à l'inhibition et à la régulation des comportements et émotions. Les aires pariétales sont généralement associées à la cognition spatiale, à la navigation, à la représentation de soi dans l'environnement ainsi qu'au contrôle visuomoteur (Kober et al., 2012). Ces données sont corroborées par des analyses utilisant cette fois-ci l'imagerie magnétique fonctionnelle et qui ont montré une régulation par les cortex préfrontaux des activités pariétales, avec notamment une distinction entre cortex préfrontal gauche et cortex préfrontal droit (Baumgartner et al., 2008). Ces résultats tendent à suggérer un réseau fronto-pariétal contrôlant la sensation de présence dans l'environnement virtuel. Ce réseau engloberait pour la partie pariétale les régions extra-striatum, le faisceau visuel dorsal, les cortex pariétaux supérieurs et inférieurs, des parties du faisceau visuel ventral, le cortex prémoteur ainsi que des structures basales méso-temporales (Jäncke et al., 2009). Concernant la partie frontale, les aires impliquées et servant de régulation aux processus pariétaux seraient le cortex dorso-latéral préfrontal ainsi que le cortex préfrontal médian. Il convient cependant de dire qu'il ne s'agit pas ici d'un réseau supportant exclusivement le sentiment de présence car il est largement associé à de nombreuses autres fonctions psychologiques, notamment le contrôle de l'attention, l'orientation spatiale, la représentation de soi spatiale ainsi que le contrôle de l'activité motrice (Jäncke et al., 2009). Dans une autre étude utilisant l'électro-encéphalographie, Clemente et al. (2013) ont montré une corrélation entre l'activité de l'insula et le sentiment de présence. L'insula est à l'origine de nombreuses fonctions de régulations des émotions et de l'homéostasie, et l'activité de cette zone est généralement associée à la conscience de soi, au sentiment d'agentivité et d'incarnation (Craig, 2009). Ces résultats sont corroborés par une autre expérimentation en électro-encéphalographie (Clemente et al., 2014), dans laquelle les auteurs ont comparé trois systèmes immersifs : des photographies, des vidéos et une navigation libre dans un environnement virtuel, chacun étant soit réalisé sur écran d'ordinateur soit dans un système pseudo-CAVE. Clemente et al. (2014) ont ainsi montré une plus grande activation (ondes Alpha et Thêta) dans l'insula lors de la navigation comparée aux deux autres modalités. Enfin, c'est également dans l'insula, et plus particulièrement dans le cortex insulaire antérieur que Seth et al., (2011) placent le substrat neurologique de leur modèle prédictif de la présence consciente.

Les liens entre attitude envers la réalité virtuelle, sentiment de présence et excitation émotionnelle sont par ailleurs au cœur de l'étude de en électro-encéphalographie de Uhm et al. (2020) qui ont trouvé de nombreuses associations significatives.

L'étude de l'activité cérébrale liée à la présence a ouvert la porte aux techniques de neuro-imagerie en réalité virtuelle, et des techniques autres que l'électro-encéphalographie ou l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (Baumann et al., 2003; Mraz et al., 2003) sont validées, notamment la spectroscopie proche infra-rouge (Carrieri et al., 2016; Seraglia et al., 2011), ou encore la sonographie Doppler transcrânienne grâce à laquelle des auteurs ont pu détecter des changements hémodynamiques associés à différents niveaux de présence (Alcaniz et al., 2009; Rey et al., 2010, 2011). La question de l'activité cérébrale de la présence est une question cruciale. En effet, de plus en plus de recherches de neuro-imagerie – dont l'objet d'étude n'est pas le sentiment de présence – tendent à s'emparer de l'outil de la réalité virtuelle afin d'observer l'activité cérébrale dans des environnements écologiques. Cependant, si le sentiment de présence lui-même engendre une activité cérébrale distincte, il convient de pouvoir la détecter afin de la soustraire lors d'études d'activités annexes, à la façon d'un réseau basal résultant de l'immersion. Enfin, et même si ces mesures du sentiment de présence apportent beaucoup de choses, il convient de préciser tout d'abord que certaines des expérimentations de neuro-imagerie sont réalisées lors d'immersions peu englobantes (écrans d'ordinateurs), dont les techniques d'imagerie ne permettaient jusqu'à récemment qu'une évaluation statistique assez éloignée d'un comportement écologique (Park et al., 2018), mais surtout que ces méthodes d'évaluation sont lourdes et qu'elles ne peuvent constituer une mesure rapide, efficace et peu coûteuse du sentiment de présence.

2.2.6. Facteurs modérateurs du sentiment de présence

Ijsselstein et al, (2000) proposent, à la façon de Slater & Wilbur (1997) et Witmer & Singer (1994), leur propre taxonomie pour investiguer les facteurs affectant le sentiment de présence: i) *extent and fidelity of sensory information* qui correspond peu ou prou à la *vividness*, il s'agit du nombre et de la qualité d'informations présentées au sujet, ii) *match between sensors and the display* qui correspond à la dimension interaction avec l'environnement virtuel, iii) *content factors* qui englobe en fait tous les facteurs qui ne rentrent pas dans les premières cases, et enfin iv) *user characteristics* qui correspond aux facteurs humains. Puisque le présent travail doctoral propose de mettre l'accent sur les facteurs humains, ils sont considérés comme une catégorie à part traitée en deuxième partie. La distinction entre facteurs humains et facteurs systèmes peut se faire sur la simple

différence d'une évaluation inter-sujets : lors d'études empiriques en réalité virtuelle, deux individus vont expérimenter un même environnement virtuel composé des mêmes facteurs systèmes. Les facteurs similaires d'une expérimentation à l'autre sont donc les facteurs extrinsèques, alors que tous les facteurs qui diffèrent entre les deux expérimentations, les facteurs génétiques et épigénétiques du participant, constituent eux les facteurs intrinsèques. Considérant les facteurs systèmes, nous considérons la présence à deux dimensions (immersion – interaction) de (Wirth et al., 2007) et considérons que ces deux catégories se superposent déjà largement et qu'il n'est nul besoin de nouvelles taxonomies pour appréhender les caractéristiques immersives favorisant le sentiment de présence.

2.2.6.1. Les facteurs systèmes

Les facteurs systèmes sont les caractéristiques immersives de la technologie qui vont favoriser l'émergence et le maintien du sentiment de présence. Ces facteurs sont regroupés en autant de différentes catégories qu'il existe d'auteurs du domaine, certaines étant décrites plus en amont dans ce travail dans la partie sur l'immersion. Ces séparations artificielles n'existent que dans un souci de clarté et un besoin taxonomique compulsif propre aux chercheurs. En effet, si l'on considère un facteur immersif comme la vue stéréoscopique et qu'il est demandé de le ranger soit dans la catégorie qualité sensorielle soit dans la catégorie qualité interactionnelle, il semble raisonnable de dire qu'il appartient aux deux. En effet, la notion de profondeur permet une meilleure représentation de l'environnement et donc une fidélité sensorielle plus élaborée. Mais cette notion de profondeur apportée par la vision stéréoscopique permet notamment au sujet de mieux saisir les distances entre lui et les objets environnants, et cette distance n'existe que parce qu'il y a une interaction réciproque avec ce même environnement ; on peut donc également considérer qu'il s'agit d'un facteur d'interaction. Pour se faire une idée de la séparation entre immersion et interaction de Wirth et al. (2007) – qui n'a pas lieu d'être dans un cadre gibsonien – nous pouvons considérer la première comme la qualité figée à un moment T de l'environnement virtuel, une sorte de photographie multisensorielle de l'environnement virtuel et de ses qualités représentationnelles ainsi que de ses qualités à évoquer une réalité (Pillai et al., 2013). La seconde, l'interaction, peut alors être considérée comme l'expérience dynamique de cette réalité évoquée, et notamment comment celle-ci s'adapte lorsqu'elle est confrontée au comportement du sujet.

Un exercice de pensée relativement intéressant pour appréhender les différents niveaux d'immersion générés par des technologies variées est proposé par Slater et al. (2010). Les auteurs proposent d'évaluer les capacités d'un système immersif par ses capacités à simuler d'autres sys-

tèmes immersifs. Par exemple, il est possible dans un système CAVE de simuler de façon récursive un ordinateur, ou même un écran stéréoscopique ; l'inverse est impossible. Il est par contre possible dans un casque de réalité virtuelle de reproduire une CAVE, la réciproque dépendant de la qualité de la CAVE. Cet exercice permet de faire ressortir les différences entre les outils et donc de les analyser.

2.2.6.1.1. *Immersion*

Il est généralement suggéré que plus les informations de la réalité physique sont cachées au participant (quantitativement et qualitativement) et plus les informations de la réalité virtuelle sont riches (quantitativement et qualitativement), plus l'environnement utilisé sera immersif. L'interaction entre les dimensions quantitatives et qualitatives est primordiale. Remplir et saturer un monde virtuel d'informations de mauvaise qualité sera délétère pour le sentiment de présence, de même que présenter un modèle 3D de qualité exceptionnelle dépourvu de contexte n'engendrera pas de présence (à la rigueur une présence d'objet). La richesse des informations virtuelles doit être considérée comme un juste milieu entre qualité et quantité, à l'image de la création musicale. En effet, les silences sont au cœur de nombreux chefs-d'œuvre musicaux, que ce soit le silence précédant le *drop* dans la musique électronique ou celui précédant la reprise du contrepoint chez Jean-Sébastien Bach. Ces silences font partie de l'œuvre et constituent sa richesse, et mettent en valeur les notes qui la composent. De la même façon, un environnement virtuel pour évoquer de la présence doit jouer des silences et ne pas saturer d'informations son participant, tout en induisant celles nécessaires à son immersion. Cette richesse des informations immersives est généralement considérée comme largement constituée de la cohérence entre plusieurs modalités sensorielles. Cette hypothèse est à rapprocher de la représentation de modèle interne de Wirth et al. (2007) ainsi que plus globalement de la perception comme un système d'hypothèses. Il peut être argumenté que ce système de confirmation des hypothèses sensorielles résulte d'une évaluation concomitante des informations issues des différents systèmes perceptifs, d'où l'importance de la congruence sensorielle. Pour donner un exemple, il est probablement préférable de ne pas avoir de son du tout lorsqu'un participant ouvre une porte virtuelle, plutôt qu'un son décalé.

Pour reprendre l'exercice de pensée récursif de Slater et al., (2010), lorsque l'on compare l'immersion dans une CAVE par rapport à l'immersion générée par un écran d'ordinateur, deux dimensions principales ressortent. Tout d'abord, la CAVE est largement plus englobante du point de vue sensoriel, du moins visuellement. Les qualités englobantes des systèmes sont d'ailleurs corrélées empiriquement à un plus grand sentiment de présence (Baños et al., 2004; Kwanguk Kim et al., 2012). Ensuite, la CAVE permet l'intégration de plusieurs modalités sensorielles autres

que le couplage audiovisuel. Elle permet par exemple l'utilisation de gants de données avec retour haptique, ou tout simplement le couplage visuo-vestibulaire. Le nombre de modalités couvertes par un système immersif mais surtout la cohérence entre ces modalités sont largement corrélés à un sentiment de présence plus élevé (Cooper et al., 2018; Dinh et al., 1999; Hoffman et al., 1998; Schuemie et al., 2001). De façon plus générale et indépendamment de la technologie, le réalisme pictural de l'image a également un effet positif sur le sentiment de présence (Welch et al., 1996), de même que l'utilisation de la stéréoscopie (J. Freeman et al., 2000) ou d'un système d'ombres dynamiques (Slater et al., 1995). Le taux de rafraîchissement est également un facteur positif de la présence (Barfield & Hendrix, 1995), de même que, pour la dimension auditive, l'utilisation de son spatialisé ou binaural (Hendrix & Barfield, 1996b; Sugiura et al., 2016). Un environnement comportant des personnes ou mêmes des personnages plus ou moins anthropomorphiques semble susciter davantage de présence, probablement via une activation de la présence sociale, et cette présence semble même pouvoir être transférée à d'autres participants (Bulu, 2012; Daher et al., 2016, 2017). Enfin, un environnement anxiogène ou virtuellement dangereux semble également provoquer davantage de présence (Bouchard et al., 2008; Juan & Pérez, 2009; Laframboise et al., 2006; Ling et al., 2014).

2.2.6.1.2. Interaction

L'interaction entre l'environnement virtuel et le sujet est régulièrement suggérée comme le cœur de l'émergence du sentiment de présence. Certains auteurs parlent à ce sujet d'interfaces comportementales, sensorielles, motrices et / ou cognitives (Auvray & Fuchs, 2007; Fuchs et al., 2006), que la réalité virtuelle est destinée à rendre invisibles. Pour des auteurs gibsoniens, le sentiment de présence – comme la perception – est issu exclusivement de l'interaction perçue comme supportée par l'environnement. Il en est effet discutable que le simple fait de regarder dans un environnement virtuel constitue une forme d'interaction avec celui-ci. Quoiqu'il en soit, les résultats empiriques ont montré de nombreux effets positifs de l'interaction sur le sentiment de présence (Welch et al., 1996), notamment de la navigation dans l'environnement (Balakrishnan & Sundar, 2011). Plus précisément, la taille du champ de vision du participant semble largement impacter le sentiment de présence (Prothero & Hoffman, 1995), alors qu'un délai ressenti entre l'environnement et l'objet a lui un impact négatif sur le sentiment de présence (Welch et al., 1996). Les possibilités de déplacement au sein de l'environnement ont été montrées comme un facteur positif (Slater et al., 1998). De même, la capture des mouvements de tête des participants afin d'en adapter le rendu visuel a un impact positif sur le sentiment de présence (Hendrix & Barfield, 1996a). Gorini et al. (2011) ont montré que donner au participant des informations narratives sur

l'environnement dans lequel il est immergé augmente son sentiment de présence. Smolentsev et al. (2017) ont par exemple montré que l'utilisation d'un préambule faisant la transition contextuelle entre l'environnement physique et l'environnement virtuel augmente le sentiment de présence ressenti. Cette importance de la dimension narrative, et donc de l'interaction entre ce que le sujet sait de son environnement et l'environnement, est également largement évoquée par l'analyse qualitative de Riches et al. (2019). Ces qualités narratives que l'on pourrait qualifier d'immersion non sensorielle ou d'immersion cognitive, sont à rapprocher de l'utilisation de schèmes cognitifs décrits par Fuchs et al. (2006), et constituent une forme d'interaction puisqu'elles sont issues d'un échange entre les capacités imaginaires du sujet et les informations révélées par l'environnement. La notion de schèmes, empruntée à Piaget, correspond comme son nom l'indique à des représentations cognitives de situation guidant le sujet dans son comportement et son interaction. Un schème peut par exemple être celui d'une boulangerie, ou celui d'une salle de cours. Dans tous les cas, l'individu sait à quoi s'attendre et comment agir selon le schème rencontré. Stanney et al. (1998) parlent à ce sujet de *design metaphors* pour désigner l'utilisation de ces dernières en réalité virtuelle, que ce soit à une échelle grande et environnementale comme la boulangerie, ou petite et fonctionnelle. Nous sommes par exemple habitués dans la réalité physique à appuyer sur un interrupteur pour allumer une lumière. Cette action psychomécanique a un sens, elle permet d'ouvrir ou de fermer le circuit électrique. En réalité virtuelle, presser un bouton pour allumer la lumière n'a aucun sens ; la lumière s'allume de façon computationnelle lorsqu'un certain événement est reconnu. Pourtant, différents auteurs suggèrent que reproduire ces métaphores et ces schèmes dans les environnements virtuels permettent d'augmenter le sentiment de présence du participant, que ce soit en utilisant des représentations connues (théories rationalistes) ou des affordances connues (théories écologiques).

2.2.6.1.3. Méta-analyse

Une méta-analyse relativement récente de Cummings & Bailenson (2016) sur 83 études expérimentales - dont les études évoquées précédemment – montre que l'immersion a un effet de taille moyenne sur le sentiment de présence perçu des participants ($r = .316$). En examinant plus en détail les forces d'effet et en comparant ces dernières, les auteurs ont pu montrer que certaines fonctionnalités de la réalité virtuelle ont plus d'impact que d'autres sur le sentiment de présence. La qualité de l'image et son réalisme semblent avoir par exemple un effet relativement faible sur la présence ($r = .15$). Les capacités audio des systèmes montrent un effet faible à moyen ($r = .26$). A contrario, les études manipulant le champ de vision des sujets montrent un effet de taille

moyenne ($r = .304$), tout comme la stéréoscopie ($r = .32$). Les comparaisons entre différents systèmes (casques, CAVes et écrans) révèlent également des effets moyens ($r = .339$). L'interaction, notamment la manipulation du suivi des mouvements et l'augmentation des degrés de liberté dans l'interaction révèle quant à elle un effet moyen à fort ($r = .408$). Enfin, le taux de rafraîchissement a révélé un effet fort sur le sentiment de présence ($r = .645$). Les auteurs ont par la suite réalisé des comparaisons des tailles d'effet, et ont trouvé que les effets du suivi de mouvement sur la présence sont significativement plus forts que les autres (à l'exception du taux de rafraîchissement dont l'échantillon s'est révélé relativement faible). La stéréoscopie ainsi que le champ de vision ont également des effets plus significatifs que les autres, ce qui semble promouvoir les capacités d'interaction comme primordiales pour l'émergence et le maintien du sentiment de présence. Il convient cependant de relativiser la pertinence d'une méta-analyse sur une trentaine d'années dans un milieu technologique aussi innovant que celui de la réalité virtuelle. Prenons, pour l'exemple, l'étude sur le taux de rafraîchissement de Barfield & Hendrix (1995). Dans cette expérimentation, les auteurs ont comparé des taux de rafraîchissement de 5, 10, 15, 20 et 25 Hz. Or, les casques actuels tournent aujourd'hui autour de 70 ou 80 Hz voire plus de 100 Hz. Il est donc envisageable de considérer un effet seuil au-delà duquel le taux de rafraîchissement n'est plus significatif. Cette limite s'applique tout aussi bien à la qualité de l'image, à la résolution, la latence ou même au champ de vision.

2.2.6.2. Les facteurs humains

Les facteurs humains, aussi appelés caractéristiques utilisateurs ou facteurs intrinsèques, semblent moins étudiés dans la littérature que les facteurs systèmes. Pour cause, les premiers à s'être emparés de l'étude de la réalité virtuelle sont des chercheurs issus de l'ingénierie et de l'informatique dont l'objet d'intérêt premier est la technologie (Sanchez-Vives & Slater, 2005). Les facteurs humains sont souvent regroupés dans une catégorie à part des taxonomies de l'immersion (Ijsselstein et al., 2000; Slater & Wilbur, 1997; Witmer & Singer, 1994). Ces facteurs sont extrêmement voire infiniment nombreux ; il s'agit de toutes les caractéristiques individuelles, innées ou acquises, qui vont moduler l'expérience du sentiment de présence en réalité virtuelle. Considérant que le sentiment de présence est un qualia, un contenu d'état mental par nature subjectif, il est en effet fondamentalement différent d'un sujet à l'autre selon les attributs de l'individu. Le but ici n'est pas d'établir une description qualitative de ce phénomène, mais bien quantitative. En effet, certaines dimensions de la psychologie humaine présentent des effets plus ou moins récurrents et plus ou moins forts sur la construction du sentiment de présence, dimensions qu'il convient de

présenter afin de s'assurer une meilleure compréhension du phénomène de présence. Ces différents facteurs sont parfois réunis sous le terme de propension à l'immersion. Cette propension est une construction multidimensionnelle qui correspond aux facteurs humains susceptibles d'influencer la sensibilité individuelle au sentiment de présence, tels qu'étudiés par Witmer & Singer, (1998). Les auteurs ont créé un questionnaire destiné à évaluer cette propension à l'immersion (*Immersive Tendencies questionnaire*). Ce questionnaire, adapté en français par Robillard et al. (2002) sous le nom de Questionnaire sur la Propension à l'Immersion, évalue différentes dimensions (focus, implication, émotions, jeu). Il convient de noter que Witmer & Singer (1998) ont trouvé des corrélations significatives entre les scores au Questionnaire sur la Propension à l'Immersion et ceux au Questionnaire sur l'Etat de Présence, et que ces résultats ont été confirmés par la suite (Kober & Neuper, 2013). La propension à l'immersion est donc à la fois le nom d'un questionnaire défini évaluant principalement les capacités de concentration de l'individu, mais aussi une construction plus large dont certaines sous-dimensions sont détaillées ici individuellement.

2.2.6.2.1. Les cybermalaises

Les cybermalaises (*cybersickness*) constituent un ensemble de symptômes proches de ceux du mal des transports. Ils sont définis par Rebenitsch & Owen (2016) comme l'apparition de nausées, de troubles oculomoteurs et/ou de désorientation lors de l'expérience d'environnements virtuels. Le terme de « cybermalaises » est parfois utilisé de façon interchangeable avec le mal des simulateurs, et pour cause ces deux phénomènes sont considérés – mais pas toujours (Stanney et al., 1997) – comme partageant de nombreux processus (Davis et al., 2014; Y. Y. Kim et al., 2005; Rebenitsch & Owen, 2016a; Shafer et al., 2017). Les cybermalaises ont longtemps freiné le développement des environnements virtuels (Shafer et al., 2017). Dans son histoire de la réalité virtuelle, Lanier (2017) précise que tout lieu de démonstration de l'outil était équipé de bassines, et ce jusqu'à la fin des années 1990. La prévalence des symptômes est compliquée à évaluer, elle se situe selon les études entre 30% et 80%. Il est généralement considéré que entre 5 à 8% des participants seront tellement incommodés par ces symptômes qu'ils devront couper court à l'expérimentation (Y. Y. Kim et al., 2005; Rebenitsch & Owen, 2016a). De nombreux facteurs sont évoqués dans la littérature comme potentiellement évocateurs de cybermalaises : le délai de transmission, les erreurs de suivi de mouvement, l'effet de *flicker* ou scintillement, le champ de vision (LaViola, 2000; Toet et al., 2008). De plus, et alors que les enfants sont largement plus touchés par le mal des transports classiques (Paillard et al., 2013), il semblerait que cet effet soit

inversé en immersion virtuelle (Arns & Cerney, 2005; Knight & Arns, 2006). La durée de l'exposition augmente elle aussi l'apparition de symptômes (Stanney et al., 2003), même s'il existe une forme d'habituation permettant de réduire leur émergence (Howarth & Hodder, 2008). Les symptômes de cybermalaises sont généralement évalués post-facto à l'aide du *Simulator Sickness Questionnaire* de Kennedy et al. (1993) validé et restructuré en français par Bouchard et al. (2007). En effet, les symptômes de cybermalaises peuvent durer jusqu'à plusieurs heures après l'immersion. Les substrats neurobiologiques des cybermalaises sont encore peu connus, mais il existe deux principales théories explicatives. La première, celle de l'incongruence sensorielle (*sensory mismatch*), est la plus connue dans la littérature du mal des transports (Reason & Brand, 1975). Dans ce cadre, le mal des transports apparaît lorsque le système nerveux perçoit des informations incongruentes entre deux ou plusieurs modalités sensorielles. Par exemple, lorsque dans la cale d'un bateau le système visuel ne détecte aucun mouvement alors que le système vestibulaire perçoit le déplacement du navire sur les vagues. Il s'agirait en réalité virtuelle du même mécanisme, mais inversé : dans son casque de réalité virtuelle, le sujet perçoit visuellement un flux dynamique indiquant un mouvement, alors que son système vestibulaire n'en perçoit aucun. Dans certaines théories il s'agit d'un mécanisme évolutif qui associe les incongruences perceptives avec l'ingestion de toxine dont le système nerveux doit se débarrasser (Treisman, 1977). Cette théorie explique relativement bien pourquoi la vection, la sensation de déplacement, est fortement corrélée aux cybermalaises. La deuxième théorie discutée dans la littérature est celle dite de l'instabilité posturale. Celle-ci postule que le mal des transports apparaît lorsqu'un individu n'est plus capable de maintenir une posture adaptée au regard des stimuli de l'environnement extérieur. L'instabilité posturale peut être considérée comme une forme plus précise d'inadéquation sensorielle mais qui se concentre sur l'incapacité du système vestibulaire à faire face au stimulus. Cette théorie a l'avantage de proposer un cadre expérimental et des mesures objectives ; plus la posture est instable, plus le sujet éprouvera de symptômes (Rebenitsch & Owen, 2016a).

Suite à de nombreuses études et de nombreux débats concernant la relation entretenue entre cybermalaises et sentiment de présence, une revue de littérature réalisée récemment par Weech et al. (2019) semble statuer sur une relation significative négative : l'apparition de symptômes de cybermalaises serait associée à un sentiment de présence plus faible. Les auteurs relèvent certaines variables potentiellement associées : le sentiment de présence aussi bien que les cybermalaises seraient augmentés par l'addition de la stéréoscopie, d'un élargissement du champ de vision ainsi que par la vection dans l'environnement virtuel (Weech et al., 2018, 2019). Cependant, aucune direction causale ne peut être considérée. Si Weech et al. (2019) considèrent qu'une

susceptibilité moindre aux cybermalaises pourraient reposer sur les mêmes processus qu'une propension accrue au sentiment de présence, soit la gestion d'incohérences perceptives, il est impossible d'affirmer que l'un agit sur l'autre. En effet, il est possible d'argumenter que la présence de cybermalaises réduise le sentiment de présence, par exemple en allouant davantage de ressources attentionnelles en dehors de l'environnement virtuel, vers le corps. Il est également possible d'avancer que le sentiment de présence inhibe la perception des cybermalaises comme il le fait avec la douleur (Gutierrez-Martinez et al., 2010; Hoffman, Sharar, et al., 2004). De plus, il convient de noter que la fatigue visuelle, causée par le conflit entre vergence et accommodation, est parfois comprise dans les cybermalaises, et parfois séparée de ces derniers (Iskander et al., 2018). Cette dernière semble en relation étroite avec l'utilisation de la stéréoscopie, et pourrait jouer un rôle sur la charge cognitive du participant (Szpak et al., 2019). En tout état de cause, les cybermalaises constituent un facteur fondamental de la réalité virtuelle, et ses liens aussi bien avec le sentiment de présence que la performance à la tâche sont étroits. En effet, il est important de noter que ces symptômes négatifs sont connus pour impacter négativement les performances cognitives (Gresty et al., 2008; Gresty & Golding, 2009; Kennedy et al., 1993; Szpak et al., 2019).

2.2.6.2.2. *Le style cognitif*

Les styles cognitifs sont définis comme des stratégies, des préférences et des attitudes relativement stables qui déterminent les « typical modes of perceiving, remembering and problem solving » (Messick, 1976). Ils sont considérés comme les modes par lesquels les apprenants « approach, acquire and process information » (Witkin & Goodenough, 1981). Le concept va parfois plus loin pour impliquer le fonctionnement social de l'individu (Messick, 1976). Le facteur le plus répandu et le plus étudié dans la littérature sur les styles cognitifs est la dépendance-indépendance au champ. Cette construction unidimensionnelle correspond à la capacité d'un individu à effectuer une tâche analytique perceptuelle (Witkin et al., 1971), telle que mesurée par des instruments comme le test des Figures Enchevêtrées ou le test de la Baguette et du Cadre (le Embedded Figures Test et le Rod and Frame Test) tous deux conçus par Witkin et al. (1962; 1971). Pour citer les pionniers du domaine (Witkin et al., 1977), la dépendance au champ est :

the extent to which the person perceives part of a field as discrete from the surrounding field as a whole, rather than embedded in the field ; or the extent to which the organization of the prevailing field determines perception of its components ; the extent to which the person perceives analytically.

Dans un mode de dépendance au champ, la cognition individuelle est fortement dominée par l'organisation holistique du champ perceptuel: des parties du champ sont fusionnées (Pithers, 2002). Dans un mode d'indépendance à l'égard du champ, la cognition est plutôt dominée par

l'organisation analytique du champ perceptuel, et les parties sont distinctes de l'organisation globale. Les dimensions de dépendance et d'indépendance à l'égard du champ ont été à l'origine principalement considérées pour désigner le type d'indices utilisés pour la perception (Tinajero & Páramo, 1998; Witkin & Asch, 1948). Dans cette optique qui a conduit à la dichotomie analytique-holistique plus célèbre, la dépendance à l'égard du champ était utilisée pour désigner les individus utilisant majoritairement des indices visuels, tandis que l'indépendance était utilisée pour désigner des individus utilisant majoritairement des indices non visuels, comme les modalités vestibulaires, proprioceptives ou kinesthésiques. Les scores et les courbes de distribution de la dépendance à l'égard du champ suivent une loi normale. Witkin et al. (1977) suggèrent qu'être d'un côté ou de l'autre de cette dimension n'est pas une preuve de performance cognitive, mais plutôt l'illustration de stratégies cognitives différentes. Cependant, de nombreux auteurs ont réfuté cette hypothèse. Le moins que l'on puisse dire sans prendre parti est que chacune de ces différentes stratégies présente des avantages et des inconvénients différents. En effet, de nombreuses études ont fait état de corrélations entre les mesures de dépendance au champ et diverses aptitudes, par exemple différentes formes d'intelligence, les résultats scolaires, les aptitudes spatiales, pour lesquelles les individus indépendants au champ semblent manifester un avantage constant (Evans et al., 2013; Pithers, 2002; Tinajero & Páramo, 1998). Il existe même dans le domaine un débat consistant à déterminer si indépendance au champ et intelligence sont réellement des concepts distincts. Ce qui semble avéré est que les individus indépendants au champ ont une meilleure mémoire de travail, notamment concernant la capacité à récupérer des informations pertinentes pour la tâche ainsi que l'attention sélective. Il est généralement considéré que les individus indépendants à l'égard du champ minimisent leur charge cognitive en sélectionnant des informations pertinentes et en inhibant celles qui ne le sont pas, de sorte qu'ils ont globalement moins d'informations à traiter.

Différents résultats et hypothèses font de la dépendance au champ un concept particulièrement intéressant en réalité virtuelle. Tout d'abord, une meilleure inhibition et sélection de l'information suggèrent une plus grande susceptibilité au sentiment de présence (par inhibition des informations de la réalité physique), résultat qui a été testé et confirmé empiriquement par Hecht & Reiner (2007) sur la présence d'objet. Les auteurs suggèrent que cette corrélation entre indépendance au champ et sentiment de présence d'objet peut se transposer à la présence spatiale. Leur interprétation est que les sujets indépendants à l'égard du champ ont moins de difficultés, notamment par une meilleure inhibition mais aussi par une moindre dominance de la modalité visuelle, à passer outre les bugs ou défauts du champ perceptuel, majoritairement visuel. Hecht & Reiner

(2007) défendent en outre que les individus indépendants à l'égard du champ s'appuient davantage sur des repères personnels, vestibulaires ou même issus de leur imagination, pour « fill the gaps » de l'environnement virtuel. Il est possible d'aller plus loin en prenant également en compte les cybermalaises. En effet, la dominance des informations visuelles rend les sujets dépendants à l'égard du champ plus sensibles aux phénomènes devection et de scintillement, et donc d'incongruences perceptives. La dépendance à l'égard du champ est d'ailleurs corrélée à une plus grande sensibilité au mal des transports (Cian et al., 2011; Kennedy, 1975), ce qui corrobore cette hypothèse. Toutes ces données font de la dépendance au champ un concept crucial pour l'étude des facteurs humains en réalité virtuelle, notamment pour articuler les relations entre présence, cybermalaises, et performance.

2.2.6.2.3. La pratique des jeux vidéo

L'expérience des jeux vidéo est un facteur régulièrement évoqué comme potentiellement bénéfique pour le sentiment de présence. En effet, si la réalité virtuelle n'est pas encore réellement adoptée par le grand public, le jeu vidéo est un fait sociologique qui partage de nombreux codes et processus avec cette dernière. Selon la Software Entertainment Association (2019) près de 65% des adultes américains jouent à des jeux vidéo, et ces joueurs y consacrerait en moyenne sept heures par semaine. Cette expérience des jeux vidéo a très probablement un impact sur divers aspects de la vie des individus (Boyle et al., 2016; C. Jones et al., 2014). Concernant la réalité virtuelle, il est possible d'arguer que la pratique du jeu vidéo aide l'individu à s'adapter à un monde virtuel et à interagir avec ce dernier, puisqu'il s'agit généralement du cœur de l'expérience vidéoludique. En plus de partager de nombreux facteurs ergonomiques, le fait de jouer à un jeu vidéo pourrait entraîner une habitude par exposition aux cybermalaises. Il existe en effet dans la littérature une corrélation entre l'expérience de jeu et la réduction de symptômes de cybermalaises en réalité virtuelle (De Leo et al., 2014; Knight & Arns, 2006; Rosa et al., 2016), même si elle n'est pas toujours reproduite (Ling et al., 2013). Il est cependant, encore une fois, impossible d'inférer une causalité directionnelle : est-ce que les jeux vidéo produisent une habitude aux cybermalaises par exposition à des incongruences perceptives, ou est-ce que les sujets plus sensibles à ces effets négatifs sont moins attirés par les jeux vidéo qui en sont les vecteurs ?

La relation entre jeux vidéo et sentiment de présence n'est pas plus claire. Certaines études ne font état d'aucune corrélation (Alsina-Jurnet & Gutiérrez-Maldonado, 2010) alors que d'autres en rapportent, voire décrivent les possibilités d'entraînement du sentiment de présence (Gamito et al., 2010; Lachlan & Krcmar, 2011; Rosa et al., 2016). De la même façon, inférer une causalité n'est pas sans risque. Il est en effet possible que les joueurs ressentent davantage de présence

en réalité virtuelle soit parce qu'ils ont moins besoin d'allouer de ressources attentionnelles à l'interface en reconnaissant mieux les schèmes cognitifs, ou bien parce qu'ils perçoivent mieux les affordances de l'environnement, tout comme il est possible que les individus moins sensibles à l'immersion soient moins intéressés, a priori, par les jeux vidéo. De plus, la pratique des jeux vidéo semble dépendante du contexte de jeu : jouer avec ou contre des amis semblent engendrer davantage de présence et d'engagement qu'avec ou contre des étrangers (Ravaja et al., 2006). Il convient également de noter que la pratique des jeux vidéo peut largement influencer la performance des individus, et ce bien au-delà de l'aspect ergonomique. En effet, des études ont montré que la pratique des jeux vidéo améliore les performances cognitives sur diverses tâches, notamment la navigation virtuelle (Murias et al., 2016; Richardson et al., 2011), les capacités visuo-spatiales (Green & Bavelier, 2006), l'acuité visuelle (Green & Bavelier, 2007) et bien d'autres tâches cognitives, sensorielles et motrices (Boot et al., 2011; Pallavicini et al., 2018). Il a par exemple été reporté que le simple fait de jouer à des jeux vidéo réduit les différences entre les sexes en matière de cognition spatiale (Feng et al., 2016).

Cependant, utiliser la pratique des jeux vidéo comme un concept unitaire unique pourrait se révéler trop imprécis. En effet, le jeu vidéo est un terme général qui englobe de nombreux genres différents, et ces différents genres représentent non seulement des environnements de jeu très différents (par exemple entre des pratiques ponctuelles dans les transports en commun ou lors de sessions intensives), mais aussi des processus perceptifs, cognitifs et moteurs très différents. Outre les genres eux-mêmes, une distinction est souvent faite entre jeu occasionnel *casual gaming* et jeu intensif *intensive gaming*. Les jeux occasionnels sont des jeux qui s'adressent généralement à des joueurs non expérimentés et qui comportent des règles simples permettant de terminer le jeu dans des délais raisonnablement courts. En outre, les jeux occasionnels sont généralement multiplateformes et ne nécessitent pas de calculs graphiques ou computationnels lourds (Baniqued et al., 2013; Juul, 2010; Kuittinen et al., 2007). Les jeux occasionnels peuvent par exemple être des jeux de puzzles ou de correspondance, et des exemples canoniques en sont Candy Crush Saga, Farmville ou encore les Sims. Au contraire, les jeux intensifs nécessitent généralement un PC ou une console de jeu (souvent récents), ainsi qu'un temps d'entraînement pour être appréhendés. Ces jeux constituent souvent un défi pour le joueur (en particulier lorsqu'il est confronté à d'autres joueurs) au point de se retrouver en situation de stress. Ces jeux sont généralement très stimulants, notamment visuellement mais aussi du point de vue de la cognition et des habiletés motrices fines nécessitant une forte coordination œil-main. Ils présentent souvent la caractéristique de ne pas pouvoir être réellement achevés puisque leur fonctionnement est similaire à celui d'une partie d'échecs en temps réel : les joueurs débutent toujours au même point

de départ, mais leurs choix vont très rapidement rendre chaque partie unique. Ainsi, même lorsqu'une partie est achevée, le jeu lui-même ne l'est pas vraiment, laissant de la place à l'apprentissage et l'amélioration. En effet, l'analogie avec le jeu d'échecs peut également être appliquée à la complexité de ces jeux, difficiles voire impossibles à maîtriser réellement, et dont la grande majorité des joueurs répètent les coups des experts et s'en inspirent – à l'instar des ouvertures classiques aux échecs. De plus, ces jeux sont des jeux compétitifs – dont le système de classement est inspiré voire calqué sur le système Elo – pour lesquels les meilleurs joueurs deviennent professionnels et s'affrontent dans des ligues d'esport similaires aux ligues sportives. En outre, ces types de jeux sont généralement ceux associés aux troubles du comportement addictif vidéoludique (Bossier & Nakatsu, 2006; C. Shawn Green & Bavelier, 2003; Kapalo et al., 2015; Rehbein et al., 2016; Saputra et al., 2017). Les exemples canoniques de jeux intensifs sont les jeux de stratégie en temps réel et les jeux d'arènes multi-joueurs comme les franchises Starcraft, Dota ou League of Legends, ou encore les jeux de tirs première personne avec la franchise Counter Strike.

2.2.6.2.4. Le genre

Un facteur fondamental dans l'investigation du sentiment de présence, notamment lorsqu'il est mis en lien avec des facteurs annexes tels que les cybermalaises, est le genre. Le titre explicite de l'article de Felnhofer et al. (2012) résume l'importance cruciale de cette question : *Is virtual reality made for Men only ? Exploring Gender Differences in the Sense of Presence*. Les auteurs ont en effet relevé des différences entre les genres sur le taux de présence ressenti, qu'ils ont attribué à différents sous-facteurs comme la suspension de l'incrédulité (Felnhofer et al., 2012; Slater et al., 1994), les habilités spatiales, des traits de personnalité comme l'extraversion ou la soumission (Lombard & Ditton, 1997), ou encore les compétences informatiques (Waller et al., 1998). Gamito et al. (2008) attribuent eux la presque totalité des différences entre les genres à la pratique des jeux vidéo.

Ces différences de pratique des jeux vidéo sont difficiles à évaluer puisque les femmes semblent aujourd'hui jouer presque autant que les hommes (Entertainment software association, 2019). Cependant, il existe toujours de grandes différences dans les genres de jeux pratiqués. En effet, un rapport sur plus de 270 000 joueurs (Yee, 2017) montre qu'environ 69 % des joueurs de jeux d'arcade, de puzzle ou de correspondance sont des femmes, alors qu'elles ne constituent que 7 % des joueurs de tir à la première personne. Sur la base de la distinction précédente, les jeux occasionnels, *casual*, sont présentés dans ce rapport comme étant essentiellement féminins, tandis que les jeux intensifs sont essentiellement masculins. Cet effet est un fait culturel difficile à

expliquer, qui pourrait être lié à des objectifs compétitifs motivationnels ou au fait que de nombreux jeux vidéo intensifs sont conçus pour les hommes, intégrant une forte sexualisation des femmes (Behm-Morawitz & Mastro, 2009; Breuer et al., 2015; Fox & Potocki, 2016; Hoeft et al., 2008; Kowert et al., 2017; Rehbein et al., 2016). Compte tenu des processus et des environnements de jeux très différents entre les différents genres, le type de jeu pratiqué devrait être intégré dans l'équation pour une meilleure compréhension non seulement du facteur jeu vidéo, mais aussi du facteur genre. En effet, ce dernier est complexifié par le fait qu'il semble également impacter les cybermalaises, les femmes rapportant davantage de symptômes que les hommes (Shafer et al., 2017). Il est tout aussi complexe de déterminer si cette plus grande susceptibilité aux symptômes négatifs résulte d'un effet biologique (effet du sexe) ou d'un effet culturel (effet du genre). Des réponses neuro-endocrinales différentes et liées au mal des transports ont par exemple été trouvées, particulièrement sur les taux de sécrétion des hormones adrénocorticotropiques et de la vasopressine (Weech et al., 2019), ainsi que des associations avec des changements hormonaux durant les cycles menstruels (Clemes & Howarth, 2005). Les symptômes de mal des transports étant généralement considérés comme causés par une réponse évolutive suite à la détection de toxines dans l'organisme (Treisman, 1977), il est possible d'argumenter que, à l'instar de la sensibilité accrue de l'odorat lors de la grossesse pour protéger l'enfant de maladies (E. L. Cameron, 2014; Profet, 1992), une plus grande sensibilité féminine aux cybermalaises pourrait s'expliquer par des réponses évolutives similaires. Des différences optiques peuvent également être en cause ; les femmes ayant semblerait-il un champ de vision plus large que les hommes, il est possible que cette différence provoque davantage de scintillement (*flicker*) eux-mêmes potentiellement provocateur de cybermalaises (LaViola, 2000). La réponse la plus pertinente est probablement un mélange d'effets du sexe et du genre, comme le révèlent les différences potentielles de style cognitif. En effet, les femmes sont généralement considérées comme étant plus dépendantes au champ que les hommes, ce que nous avons vu comme corrélé à l'émergence des cybermalaises (Kennedy, 1975; Onyekuru, 2015). Cette différence de style cognitif pourrait être due à des différences développementales durant les premiers âges de la vie ; en effet, les garçons sont plus enclins (ou incités) à jouer à des jeux de construction 3D (S. C. Levine et al., 2016), ce qui pourrait aider à développer leur cognition spatiale et ainsi réduire leur dépendance au champ visuel. Une autre explication culturelle aux différences de cybermalaises pourrait résider dans le fait que les hommes sous-estiment leurs symptômes négatifs afin de ne pas paraître faibles (Rebenitsch & Owen, 2016a). Enfin, une étude récente de Stanney et al. (2020) ont révélé des biais dans l'utilisation des casques de réalité virtuelle, notamment dus à la différence de distances moyennes inter-pupillaires entre hommes et femmes, distance qui n'est pas toujours contrôlée.

Dans leur étude Stanney et al. (2020) ont montré des niveaux de cybermalaises équivalents entre hommes et femmes lorsque cette distance interpupillaire était contrôlée. Quelle que soit la source des différences, il semble saillant que hommes et femmes ne réagissent pas de la même manière à la réalité virtuelle, et que ces différences pourraient conduire non seulement à des différences de présence ressentie, mais aussi de performance. Dans un souci de clarté, le terme de genre sera utilisé dans ce travail, bien que l'on ne puisse exclure des effets proprement biologiques dus à la différenciation inter-sexe d'une espèce sexuée.

2.2.6.2.5. Autres facteurs modérateurs

De nombreux autres facteurs, plus ou moins détaillés, sont évoqués dans la littérature comme potentiellement modérateurs du sentiment de présence. Le premier est celui de l'âge. Il est fréquemment considéré que plus le sujet est jeune, moins celui-ci aura de difficultés à adopter un nouvel outil (Egan, 1988). Il est donc possible d'arguer que plus le sujet sera jeune, moins il aura de ressources attentionnelles à allouer à l'ergonomie et à l'interface, et plus il sera présent. Cette donnée est à relativiser, car les enfants plus jeunes sont également plus sensibles aux symptômes négatifs accompagnant des perturbations sensorielles (Paillard et al., 2013). Dans l'autre sens, la diminution des qualités perceptives accompagnant le vieillissement normal de l'individu peut être considéré comme jouant un rôle sur la perception visuelle des environnements virtuels, notamment par la réduction de l'acuité visuelle et la sensibilité au contraste (Stanney et al., 1998). Les émotions sont également suggérées comme jouant un rôle important sur le sentiment de présence, ce qui n'est pas surprenant concernant les découvertes récentes sur leurs rôles sur la cognition au sens large (Damasio, 1994). Les émotions constituent d'ailleurs une sous-échelle du Questionnaire sur la Propension à l'Immersion, et différentes études ont montré un lien entre présence et émotion (Aymerich-Franch, 2010; Giuseppe Riva et al., 2007; Västfjäll, 2003), ce qui expliquerait pourquoi les environnements anxigènes sont généralement plus immersifs que les autres (Bouchard et al., 2008), bien que cette relation présence-émotions n'ait pas toujours été retrouvée (Felnhofer et al., 2015). Kober & Neuper, (2013) ont de leur côté mis en évidence des liens entre présence et différents traits de personnalité, notamment les tendances impulsives, l'empathie, le locus de contrôle ou encore les composants du Big Five – Ouverture, conscienciosité, extraversion, agréabilité, neuroticisme (Costa & McCrae, 2012). Leurs résultats montrent que les traits composant ce qu'ils l'appellent l'absorption sont les meilleurs prédicteurs du sentiment de présence, aux côtés de l'imagination. D'autres auteurs ont également trouvé des liens entre traits de personnalité et sentiment d'incarnation en réalité virtuelle (Dewez et al., 2019). Un autre

facteur couramment suggéré comme impactant le sentiment de présence est la suspension d'incrédulité ou *suspension of disbelief* évoquée précédemment. Cette suspension de l'incrédulité est un terme venant de la littérature désignant la tolérance de l'utilisateur envers le contenu fictionnel (Böcking, 2008; Laarni et al., 2015). Bien que relativement peu étudiée dans la littérature, cette suspension de l'incrédulité peut être rapprochée de certains items du Questionnaire sur la Propension à la Présence, notamment ceux de la dimension *involvement*. Cette dimension d'engagement pour Witmer & Singer (1998) réfère principalement aux capacités du sujet à être absorbé par le contenu présenté, avec des questions comme « Vous arrive-t-il d'être tellement absorbé dans un film que vous n'êtes pas conscient des choses qui se passent autour de vous ? », dimension qu'il est nécessaires de relier aux ressources attentionnelles et aux capacités d'inhibition. Cette dimension est d'ailleurs étonnamment proche de la dimension *focus*, qui incorpore par exemple des questions comme « Vous arrive-t-il d'être tellement absorbé dans une émission de télévision ou un livre que les gens autour de vous ont de la difficulté à vous en tirer ? ». Ces deux dimensions pourraient être fusionnées sous le plus grand aspect de contrôle des ressources attentionnelles, notamment au regard des concepts de sélection-inhibition, d'intensité et de maintien.

Les ressources attentionnelles ne constituent pas réellement un facteur de présence, plutôt un composant dynamique la constituant. Par analogie, considérer les ressources attentionnelles comme un facteur de présence reviendrait à dire que l'argent constitue un facteur de richesse dans l'économie. En effet, Draper et al. (1998) considèrent tout simplement que plus le sujet alloue de ressources attentionnelles vers l'environnement virtuel, plus celui-ci sera présent. Ceci étant considéré, il ne peut pas être exclu, comme nous l'avons discuté, que présence et ressources attentionnelles partagent de nombreux processus voire constituent une même dimension via l'attention. Dans ce cadre, étudier les facteurs humains en réalité virtuelle revient à analyser la modulation des caractéristiques intrinsèques du sujet sur l'allocation de ressources attentionnelles – et leur qualité – entre l'environnement réel et l'environnement virtuel. En d'autres termes, il s'agit d'analyser quelles caractéristiques du sujet vont permettre une plus grande et meilleure allocation de ressources attentionnelles à l'environnement virtuel. Cette angle de vue est particulièrement important lorsqu'il s'agit de considérer, comme c'est le cas dans ce travail de thèse, les relations entre sentiment de présence, facteurs humains, et performance en réalité virtuelle.

2.2.7. Présence et performance

2.2.7.1. La question de la performance

2.2.7.1.1. Définitions

La performance est un terme relativement vague initialement utilisé en français pour désigner le comportement d'un cheval lors d'une course, et dont le sens premier signifie accomplir, réaliser ou encore exécuter (*Littré - Performances - Définition, Citations, Étymologie*, 2020). Selon le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (2020), la performance en est venue à désigner à la fois les résultats obtenus par un athlète, notamment les exploits sportifs, ainsi que les indications chiffrées concernant les caractéristiques mécaniques d'un système. Par extension, le terme de performance a été utilisé pour rendre compte de tous les succès remportés par une personne ainsi que la manifestation publique de qualités. Par ailleurs, et toujours selon le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, la performance désigne également, en psychologie, une épreuve, au sens de test de performance, notamment dans le but « d'apprécier l'intelligence concrète, pratique d'un individu ». C'est dans ce sens qu'il est entendu dans le présent travail de recherche. Une définition plus fonctionnelle de la performance dans les études du comportement pourrait être la mesure d'un comportement d'un individu confronté à une tâche et comparée à une mesure statistique. En effet, pour parler de performance, il est nécessaire de pouvoir quantifier celle-ci par des mesures observables, et donc potentiellement de pouvoir comparer cette performance individuelle à d'autres performances. En science des comportements, et notamment en psychologie, la performance s'appréhende toujours par rapport à une norme, et une bonne performance correspond généralement à une mesure dans ou au-dessus de la norme par rapport aux conditions initiales. Par exemple, une même mesure à un test de fonctions exécutives peut constituer une excellente performance pour un individu âgé et une performance médiocre pour un individu jeune. C'est donc à travers cette performance que sont réalisés les diagnostics, mais aussi les évaluations des comportements de rééducation ou encore l'analyse des capacités et habiletés individuelles, dépendamment de facteurs autres (contextuels ou personnels).

2.2.7.1.2. Théories

La littérature générale sur la performance est relativement pauvre, principalement consacrée à ses composantes artistiques avec les performances de danse ou de théâtre. Campbell (1990) considère par exemple la littérature du domaine comme « a virtual desert », même s'il faut noter une recrudescence des études depuis les années 1990. La performance est en effet également un sujet d'études des sciences de la gestion et de la branche de psychologie axée sur le travail

et les organisations. Appliquée au monde du travail, il s'agit en effet d'une mesure permettant de rendre compte de la productivité inhérente à l'individu. Cette performance correspond donc à la capacité d'un sujet à produire et exécuter des consignes plus rapidement, d'une meilleure façon et avec moins de ressources que la norme. Cette performance est associée à des primes (reconnaisances sociales ou financières) ainsi que des avancements de carrière, même si l'effet ne semble pas si certain (Sonntag, 2003). Cependant, il existe assez peu de théories unifiées de la performance, ce que ce soit dans ces disciplines ou dans la psychologie classique, même s'il existe une psychologie de la performance, généralement associée à la psychologie de l'action et qui décrit les interactions entre l'individu, l'environnement et la tâche à réaliser ainsi que les différentes étapes de ces interactions (Nitsch & Hackfort, 2016).

En psychologie, la performance est généralement considérée comme une variable dépendante destinée à mesurer un comportement précis et à le comparer à une norme. La performance est donc une valeur neutre s'inscrivant indifféremment dans les différents cadres théoriques. Elle est par exemple au cœur de la psychométrie et de la psychologie expérimentale avec des mesures classiques comme les temps de réaction, déjà étudiés par Galton au XIXe siècle, qui correspondent au délai minimal nécessaire au traitement d'un stimulus (Woods et al., 2015). Il peut être argumenté que cette conception de la performance est toujours de mise, notamment à travers la psychologie cognitive et le cognitivisme. La psychologie cognitive considérant le système nerveux humain comme un système traitant l'information, il apparaît qu'à l'image des ordinateurs, ce traitement de l'information peut se voir affubler de nombreuses caractéristiques de performance : vitesse de traitement, consommation d'énergie, traitements parallèles, etc. Il est en effet récurrent dans ces domaines d'interroger la vitesse de traitement de l'information du cerveau (Martín, 2009), ou encore le nombre d'items que celui-ci peut garder simultanément en mémoire de travail (Miller, 1956).

Dans ce cadre, le concept explicatif au plus proche de la notion de performance est celui des ressources attentionnelles présentées précédemment. En effet, le caractère limité et dynamique de l'attention (Navon & Gopher, 1979) est généralement considéré comme central dans l'exécution d'une ou plusieurs tâches. La situation de double-tâche est en effet un paradigme récurrent, où deux performances sont évaluées simultanément permettant une évaluation de l'économie des ressources attentionnelles (Leone et al., 2017). Dans ce cadre, la baisse de performance cognitive associée à l'âge est généralement expliquée par une baisse des ressources attentionnelles disponibles (Blanchet, 2015). Deux facteurs de l'attention sont régulièrement évoqués dans la litté-

rature pour expliquer la performance d'un individu : la quantité de ressources attentionnelles disponibles allouées à la tâche, et la qualité de ces dernières pour répondre à la tâche. La performance est donc vue dans ce travail comme la mesure comportementale d'un individu face à une tâche précise, et expliquée par l'économie et la nature des ressources attentionnelles dans ce contexte. Elle peut donc prendre des centaines de formes différentes : performance de cognition spatiale lors d'un test d'orientation, performance de motricité fine lors d'une chirurgie, de richesse lexicale lors d'une conversation. Ces différentes formes vont largement moduler les demandes contextuelles (les compétences nécessaires pour répondre à la tâche) sur le sujet (les ressources attentionnelles à allouer à chacune des sous-composants de la tâche).

2.2.7.1.3. La performance en réalité virtuelle

Lorsqu'une mesure de performance est réalisée, par exemple pour évaluer le temps de réaction nécessaire au traitement de l'apparition d'un stimulus, il convient de s'assurer que cette mesure n'est pas impactée par des variables parasites. Si la perfection expérimentale est impossible à atteindre, il convient pour toute manipulation empirique de tendre vers ce but. Dans le cas du traitement du temps de réaction, le sujet sera par exemple isolé dans un laboratoire, le temps mécanique de la mesure sera soustrait, et les mêmes stimuli seront utilisés entre tous les participants. Lorsque cette performance est mesurée en réalité virtuelle, que ce soit à des fins de recherche ou de diagnostic, il est tout aussi nécessaire de contrôler l'ensemble des variables parasites impactant potentiellement cette mesure. Cependant, au-delà du respect des règles classiques de l'expérimentation, l'utilisation d'un outil aussi puissant que la réalité virtuelle engendre de nouveaux biais potentiels. Considérant le développement quasi exponentiel des applications de la réalité virtuelle, que ce soit en recherche ou en diagnostic, il est fondamental d'investiguer ces potentiels biais expérimentaux. Il est en effet tout simplement impossible de proposer une utilisation méthodologiquement rigoureuse de la réalité virtuelle si nous ne comprenons pas les différents biais inhérents à l'outil. Ces biais concernent autant le système que l'utilisateur. Du côté système, la principale préoccupation est de proposer à tous les participants la même immersion, le même substrat à l'expérience. Il est bien évidemment important de proposer un système stable : l'immersion doit être continue, sans interruption ou interférences (augmentation ou diminution de la fréquence de rafraichissement ou du délai de transmission), et identique d'un participant à l'autre, d'où l'importance de bloquer en amont les caractéristiques du système, notamment celles concernant l'affichage. Du côté utilisateur, le contrôle expérimental en réalité virtuelle dépend de nombreux facteurs humains (au premier lieu desquels se tient le sentiment de présence) et de leurs interactions, non seulement entre eux, mais également avec la performance elle-même. Il

s'agit d'une question beaucoup plus complexe à investiguer à laquelle ce travail de recherche est destiné.

2.2.7.1.4. Performance et facteurs humains

Le nombre de facteurs personnels impactant la performance humaine est potentiellement infini. Le but ici n'est pas de rendre compte de toutes ces variables, mais uniquement des principales composantes propres à l'utilisation de la réalité virtuelle et qui n'existent que dans ce cadre. En dressant un tableau des principales variables, on voit que les principaux facteurs humains suggérés comme impactant la performance en réalité virtuelle correspondent peu ou prou aux variables affectant le sentiment de présence (i.e : cybermalaises, dépendance au champ, pratique des jeux vidéo, genre) : se pose alors la question cruciale de la relation entre présence et performance. Cette question est déjà évoquée dans les premières interrogations sur le sentiment de présence de Sheridan (1992), mais c'est réellement Barfield & Weghorst (1993) puis Barfield et al. (1995) qui en font une problématique centrale :

Not only is it necessary to develop a theory of presence for virtual environments, it is also necessary to develop a basic research program to investigate the relationship between presence and performance using virtual environments. [...] we need to determine when, and under what conditions, presence can be a benefit or a detriment to performance. [...] When simulation and virtual environments are employed, what is contributed by the sense of presence per se?

L'idée heuristique commune concernant la relation présence-performance est celle d'une corrélation positive, voire d'une causalité. Il semble en effet naturel de penser que plus un participant est immergé, plus il est présent dans l'univers et plus sa performance dans ce même univers sera forte (Sheridan, 1992; Witmer & Singer, 1998). Cependant, cette vision est largement remise en question par Welch (1999). L'auteur considère, en s'appuyant sur les tâches automatisées telle que la conduite automobile, qu'un fort sentiment de présence n'est pas nécessaire pour une bonne performance dans la vie quotidienne. Welch (1999) considère ainsi que « significant correlations between presence and performance were the exception rather than the rule ». L'auteur considère donc les résultats de la littérature comme peu probants. En effet, si certains auteurs ont trouvé des associations positives entre présence et performance (Cooper et al., 2018; Grassini & Laumann, 2020; Pausch et al., 1997; Sadowski & Stanney, 2002; Slater et al., 1996; J. A. Stevens & Kincaid, 2015; Witmer & Singer, 1994; Youngblut & Huie, 2003), ou encore entre niveaux d'immersion et performance (Pollard et al., 2020), elles sont généralement faibles et parfois inexistantes (Ma & Kaber, 2006; Pallamin & Bossard, 2016). Au-delà de la question des résultats empiriques qu'il trouve improbants, l'auteur met le doigt sur un problème majeur de l'évaluation de la

relation présence-performance : la causalité. Welch (1999) prend pour exemple l'ajout de la stéréoscopie qui augmente à la fois la performance à la tâche et le sentiment de présence. Il considère ainsi qu'il existe trois possibilités : soit l'augmentation de la présence cause l'augmentation de la performance, soit l'augmentation de la performance augmente le sentiment de présence, soit un facteur annexe cause à la fois l'augmentation de présence et de performance.

Ce facteur annexe augmentant à la fois la présence et la performance indépendamment est parfois attribué à l'ergonomie du système et de l'interface. Pour mieux comprendre ceci, voici une adaptation de l'analogie de Slater et al. (1996) : imaginons que l'on demande à des participants d'effectuer un test cognitif sensorimoteur avec des balles virtuelles lancées vers eux qu'ils doivent attraper. Imaginons deux conditions expérimentales, une condition avec un fort délai de transmission (plus d'une seconde) entre le mouvement physique du participant et le mouvement de son avatar, et une condition sans aucun délai de transmission. Dans la condition sans délai de transmission, il est fort probable que le participant rapportera davantage de présence tout en manifestant une performance supérieure. Mais est-il parcimonieux d'attribuer une causalité à l'un ou à l'autre des concepts ? Même si le sentiment de présence est plus élevé, sans doute grâce à une meilleure correspondance entre les signaux sensoriels et les représentations internes (Barfield et al., 1995; Welch et al., 1996; Wirth et al., 2007), il semble plus pertinent d'attribuer les différences de performance à l'aspect pratique de l'interaction homme-machine. Sans nier que la corrélation présence-performance puisse être robuste et forte, le principe de parcimonie pousse à considérer la qualité écologique sujet-objet : les tâches intégrées sensorimotrices sont en effet particulièrement difficiles à réaliser avec un retard de transmission. Ce dilemme peut être discuté en l'intégrant à une approche écologique du couplage sensorimoteur et de la présence. Dans ce cadre, la présence comme la perception se construisent à travers les affordances de J-J. Gibson, (1977, 1979), par exemple la capacité à attraper la balle projetée vers le sujet. Lorsque le couplage sensorimoteur est altéré (dans la condition avec délai de transmission), la perception-action des affordances l'est également, et donc le sentiment de présence autant que la performance. La relation présence-performance n'est donc plus linéaire, causale, elle partage un même socle : l'interaction avec l'environnement, et c'est cette interaction qui est altérée lorsqu'il existe un délai de transmission. Il est ainsi possible d'argumenter que le facteur annexe de Welch (1999) affectant à la fois la présence et la performance réside dans l'interaction gibsonienne avec le milieu, puis que l'une et l'autre se nourrissent mutuellement par la suite par familiarisation et appropriation des affordances. Il est toutefois difficile d'affirmer ceci avec véhémence, car en suivant ce raisonnement la présence et la performance devraient systématiquement être corrélées (et fortement) puisque issues du même socle phénoménologique. Elle est cependant cohérente avec le fait que

le plus grand facteur système générateur de présence soit l'interaction avec l'environnement (Cummings & Bailenson, 2016), notamment si l'on considère que la performance est bien souvent une forme d'interaction avec l'environnement.

Il existe une autre question ajoutant à la complexité de la relation présence-performance : celle de la nature de la tâche (Nash et al., 2000). Il en effet tout à fait possible que le sentiment de présence favorise (ou soit favorisée par) la performance uniquement pour certains types de performances (par exemple des performances largement intégrées dans l'environnement comme la cognition spatiale), mais pas pour des performances beaucoup plus abstraites comme jouer aux échecs virtuellement. Stanney et al. (1998) ont par exemple montré dans leur revue des corrélations significatives dans des tâches de suivi, de recherche ou l'entraînement de tâches sensori-motrices, sans en trouver dans des tâches de connaissance spatiale. Welch (1999) suggère également que la présence favorise la performance uniquement durant des situations d'apprentissage, et qu'une fois les tâches largement automatisées, celle-ci perd son effet.

2.2.7.1.5. Performance, présence et attention

Le concept de ressources attentionnelles recoupant à la fois un paradigme courant des analyses de performance et les composants d'une notion – l'attention – très proche du concept de sentiment de présence, certains auteurs ont proposé d'investiguer la relation présence-performance par cette grille de lecture. Comme nous l'avons vu, Bystrom et al. (1999) considèrent une association directe entre présence et ressources attentionnelles :

The more attentional resources that a user devotes to stimuli presented by the displays, the greater the identification with the computer-mediated environment and the stronger the sense of telepresence.

Or, les ressources attentionnelles sont généralement considérées comme les supports dynamiques et limités de l'attention et donc de la performance (Navon & Gopher, 1979). S'il est possible d'argumenter qu'une certaine performance est réalisable avec une faible allocation de ressources attentionnelles permettant une double-tâche, par exemple la conduite automobile citée par Welch (1999) qui peut être réalisée de façon concomitante à une conversation orale entre deux passagers, il convient de noter que dès que cette performance sort du quotidien (un événement particulier sur la route), alors le conducteur y attribue l'intégralité de ses ressources attentionnelles et coupe court à la conversation. Il est d'ailleurs souvent interdit, pour cette raison, de communiquer avec un chauffeur de bus, pourtant professionnel aguerri de la conduite. Il semble donc que peu importe l'expérience dans la performance, la double-tâche réduit cette performance. C'est d'ailleurs ainsi qu'elle est utilisée expérimentalement (Killane et al., 2015; Leone et al.,

2017). Il convient également de noter que l'apprentissage de la conduite nécessite en premier lieu de nombreuses heures d'allocations intenses de ressources attentionnelles, qui, en permettant l'automatisation de certaines tâches, ont fini par libérer de plus en plus de ressources jusqu'à permettre la double-tâche. Pour toutes ces raisons, les ressources attentionnelles semblent des outils pertinents pour rendre compte de la relation présence-performance.

Si la plupart des auteurs considèrent qu'un certain niveau de présence est nécessaire pour l'exécution de tâche virtuelle (Bystrom et al., 1999), il serait trompeur de penser à une association directe significative systématique. Dans une tentative d'élaboration d'un modèle théorique de la relation présence-performance-attention, Draper et al. (1998) décrivent plusieurs équations permettant de rendre compte des relations entre ces différents concepts. C'est dans cet article que les auteurs définissent la présence comme « a state arising from commitment of attentional resources to the computer-mediated environment ». Ils ont donc, logiquement, postulé une association positive entre ressources attentionnelles alloués aux stimuli de l'environnement virtuel, et sentiment de présence dans ce même environnement, association également suggérée par Bystrom et al. (1999) dans leur propre modèle de cette relation (Figure 9). Cependant, tous les stimuli de l'environnements virtuels ne peuvent pas être pertinents pour la tâche. Ces stimuli virtuels, soit non pertinents, soit délétères pour la tâche, peuvent être considérés comme des distracteurs : une allocation de ressources attentionnelles vers ces distracteurs engendrera donc une réduction de la performance (il y aura moins de ressources attentionnelles pour les stimuli pertinents). Mais puisqu'il s'agit de distracteurs virtuels, une allocation de ressources dirigée vers eux produira également une augmentation du sentiment de présence, tout en réduisant la performance. Il apparaît donc que présence, attention et performance ne peuvent pas toujours être associés. Draper et al. (1998) considèrent ainsi la performance en réalité virtuelle comme un ratio entre les allocations de ressources attentionnelles vers les stimuli pertinents pour la tâche (virtuels et physiques) par rapport à l'ensemble des ressources attentionnelles disponibles, alors que la présence est constituée par le ratio des ressources attentionnelles dirigées vers l'environnement virtuel (pertinent et non pertinent pour la tâche) par rapport à l'ensemble des ressources attentionnelles disponibles. Ces deux ratios sont modérés par des coefficients de qualité de ces ressources attentionnelles, les auteurs considérant que certains *pools* de ressources attentionnelles sont plus efficaces pour engendrer le sentiment de présence, de même que certains sont plus efficaces pour répondre à certains types de tâches (Draper et al., 1998).

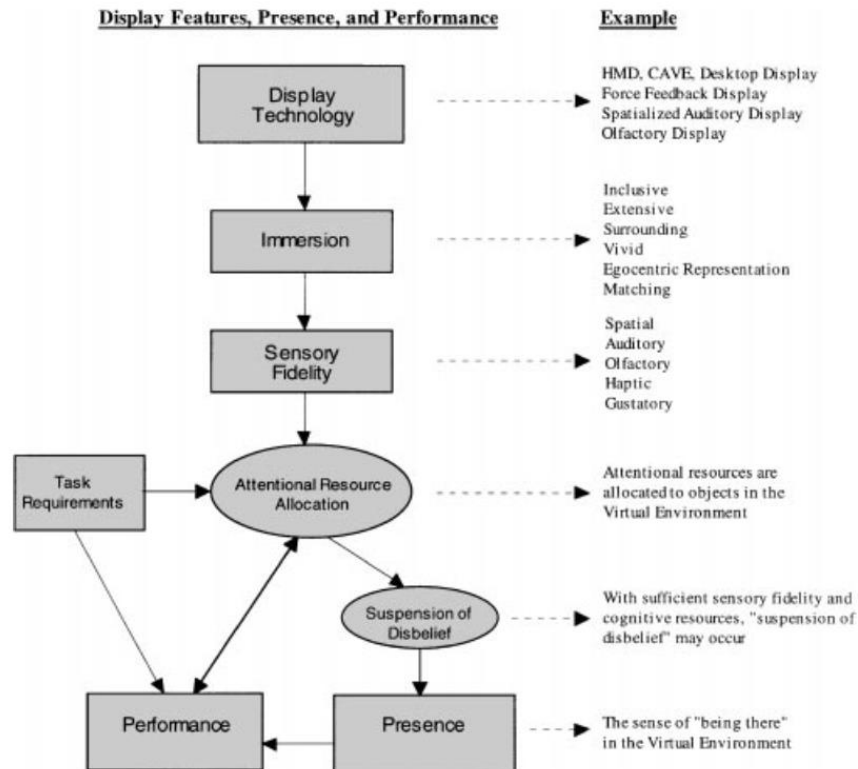


Figure 9. – Visualisation du modèle entre immersion, présence et performance de Bystrom et al. (1999).

Cette compréhension dynamique par l'attention de la relation présence-performance permet également de rendre compte de l'impact de différents facteurs humains annexes. Il peut par exemple être suggéré que l'apparition de symptômes de cybermalaises produit une allocation de ressources attentionnelles vers le corps physique du participant. Ce faisant, elle réduit l'allocation de ressources vers les stimuli pertinents pour la tâche aussi bien qu'elle réduit l'allocation de ressources attentionnelles vers les stimuli de l'environnement virtuel : elle réduit à la fois le taux de présence et le niveau de performance. Une même explication positive peut être donnée concernant la pratique des jeux vidéo. En effet, il peut être affirmé que pratiquer les jeux vidéo réduit les ressources attentionnelles nécessaires à l'allocation de l'interface, donc augmente le ratio de ressources pour la présence et la performance. Ce substrat théorique de la relation présence-performance par l'attention permet non seulement de rendre compte de l'absence de résultats empiriques probants, mais aussi d'expliquer pourquoi la nature de la tâche joue un rôle fondamental dans cette équation, autant que les facteurs humains. La question posée par cette thèse est donc maintenant, au sein de ce cadre, de comprendre l'effet de chacun des facteurs humains sur cette relation présence-performance.

2.3. Position du problème

2.3.1. Objectifs

L'objectif du présent travail de recherche est clair : il s'agit d'investiguer la relation existante entre sentiment de présence et performance en réalité virtuelle. Cet objectif est l'objectif principal et premier. Mais puisque cette relation ne saurait être réellement comprise sans la prise en compte des facteurs humains autres (cybermalaises, pratique des jeux vidéo, style cognitif, genre) impactant potentiellement soit l'un, soit l'autre, soit les deux, il devient nécessaire d'étudier la relation entretenue entre ces facteurs humains et la relation présence-performance. La réalisation de l'objectif principal passe donc par la compréhension des dynamiques existantes entre facteurs systèmes, facteurs annexes et sentiment de présence, mais aussi entre facteurs système, facteurs humains et performance. Cette compréhension elle-même passe par l'exploration d'un certain nombre d'objectifs secondaires propres à chaque étude dont les problématiques particulières sont énoncées distinctement dans la partie suivante.

Comme de nombreuses études portant sur l'outil même de la réalité virtuelle (North & North, 2016; Sanchez-Vives & Slater, 2005; Slater, 2018), le présent travail de recherche s'inscrit comme contribution à un cadre de travail méthodologique et théorique de la réalité virtuelle, notamment en recherche. Il a pour but de faire avancer les connaissances à la fois fondamentales sur les concepts en question et leurs relations, mais aussi de pouvoir proposer dans le futur une utilisation méthodologiquement rigoureuse de la réalité virtuelle. Comme nous l'avons vu, les applications de la réalité virtuelle sont en plein développement tant les paradigmes proposés par ce nouvel outil comportent d'avantages, notamment lorsque l'on considère l'apport de la dimension écologique. La question de la relation entre présence (et par extension, facteurs humains) et performance est donc cruciale dès lors que l'outil est utilisé conjointement avec une création, observation ou modification de comportements, que ce soit à des fins de recherche, de diagnostic, d'apprentissage ou encore de réhabilitation. L'évaluation de cette question devrait in fine permettre la création d'un modèle théorique de la présence et de la performance en réalité virtuelle, notamment au regard des facteurs humains en jeu.

2.3.2. Hypothèses

Différentes hypothèses à priori sont émises afin de guider la recherche expérimentale et les discussions théoriques. Bien qu'il soit nécessaire de prendre en compte les équations de Draper et al. (1998) reflétant la possibilité ponctuelle d'une non-association entre présence et performance

si le sujet alloue davantage de ressources à des stimuli virtuels non pertinents pour la tâche, nous considérons qu'un certain niveau de présence est nécessaire pour la réalisation de comportements, et donc de performance, en réalité virtuelle. En effet, à partir du moment où le sujet interagit avec son environnement virtuel pour y exécuter une forme ou une autre de performance, il y a alors allocation, à un certain degré, de ressources attentionnelles vers des stimuli à la fois virtuels et pertinents pour la tâche. Dans ce cadre, une association théorique entre présence et performance devrait donc exister quasi-systématique, si le sujet joue le jeu de la performance demandée. Cette association sera par contre plus ou moins forte, dépendamment de la nature de la tâche, et de son intégration dans l'environnement virtuel, ainsi que de certains facteurs humains, jusqu'à atteindre parfois un seuil infra-significatif. Cette hypothèse est l'hypothèse principale conjointe à l'objectif principal : sentiment de présence et performance en réalité virtuelle sont associés positivement.

Concernant les interactions entre facteurs humains, présence et performance, nous considérons les résultats de la littérature et émettons des hypothèses cohérentes aux vues des principaux composants retenus (cybermalaises, pratique des jeux vidéo, style cognitif, genre). Ces hypothèses de corrélations ainsi que leurs directions sont présentées en Figure 10 de façon schématique. Il convient de noter que certaines de ces corrélations peuvent être attendues comme des effets confondus. Nous émettons par exemple l'hypothèse que le genre féminin sera négativement associée à la performance en réalité virtuelle. Cette hypothèse n'existe qu'au regard des connaissances sur les relations avec d'autres facteurs : les femmes étant davantage sujettes aux cybermalaises (Shafer et al., 2017), moins joueuses de jeux vidéo (Entertainment software association, 2019), régulièrement suggérées comme manifestant moins de présence (Felnhofer et al., 2012) et plus dépendantes à l'égard du champ (Onyekuru, 2015), il semble logique et cohérent de poser l'hypothèse que ces effets induisent indirectement une baisse de la performance. Il conviendra alors de tenter de démêler les variables confondues pour établir des effets clairs et distincts.

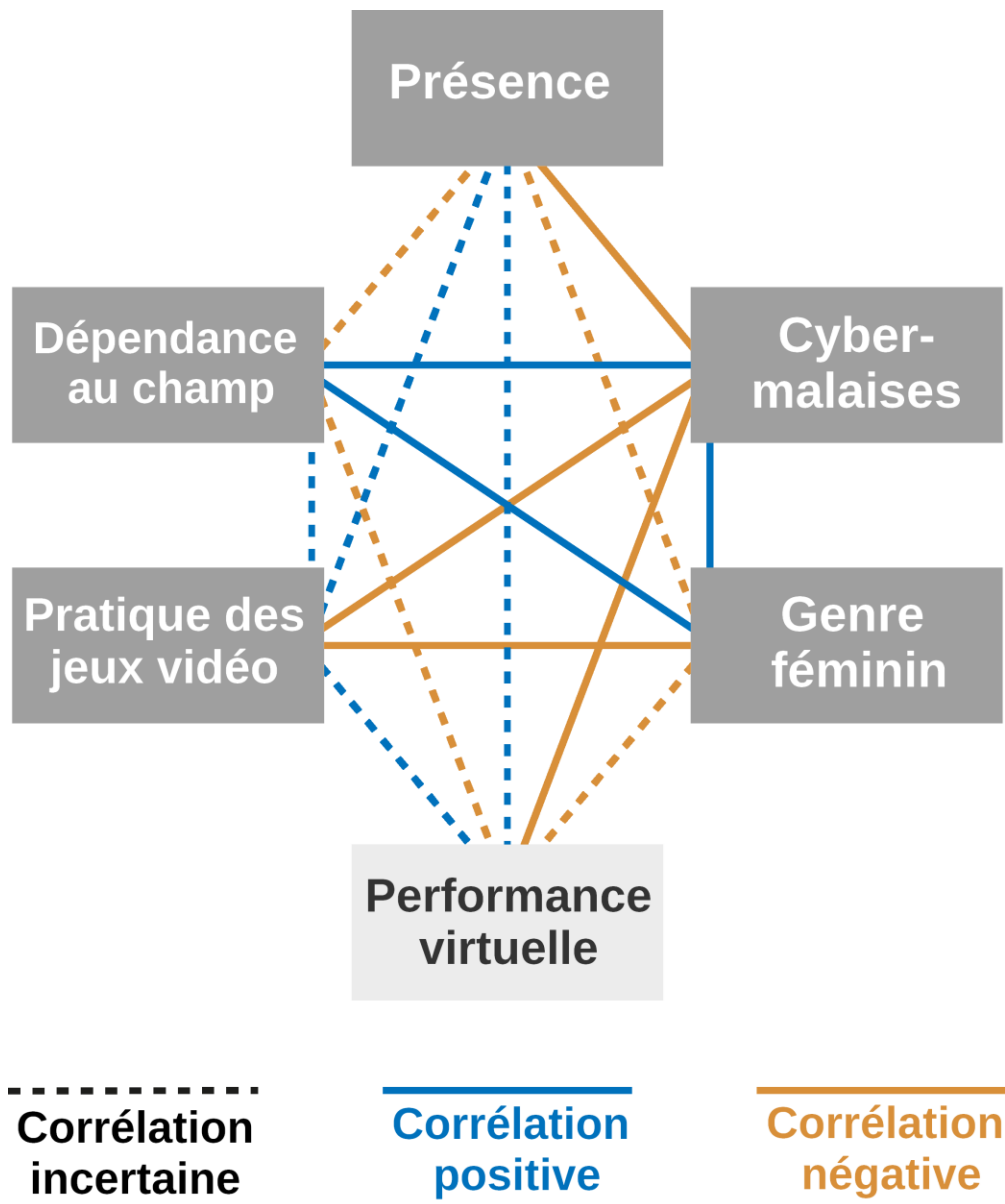


Figure 10. – Présentation schématique des hypothèses de travail concernant les associations entre les différentes variables et leurs directions selon leurs fiabilités actuelles dans la littérature.

3. Matériels et méthodes

Ce travail de recherche doctoral s'inscrit dans une méthodologie globale post-positiviste (il existe des faits plus ou moins fiables sur lesquels le chercheur peut s'appuyer) de réalisme critique (il existe une réalité que le chercheur tente d'appréhender), en incorporant un point de vue constructiviste de la réalité (chaque individu construit sa propre réalité à partir de la réalité extérieure). Dans ce cadre, la réalité extérieure peut être approchée (même si de façon imparfaite ou probabiliste) par l'empirisme, notamment par les méthodes inductivo-déductives permettant un échange entre faits et théories. Dans une approche similaire aux statistiques bayésiennes, les faits empiriques comme les théories sont considérés de façon dynamique par chaque individu comme plus ou moins crédibles ou probables : le but du scientifique étant de perpétuellement mettre à jour ces niveaux de probabilité en fonction de ses lectures et de ses expérimentations.

Le cadre théorique présenté précédemment a permis d'aboutir à une série d'hypothèses et d'objectifs. Ces hypothèses, qui seront testées empiriquement dans trois différentes expérimentations intitulées Neuroprésence (étude des fonctions exécutives), Spatioprésence (étude de la cognition spatiale), et Eduprésence (étude de l'apprentissage), tenteront de répondre aux objectifs théoriques du travail. Ces expérimentations, en plus de permettre une discussion concernant ces objectifs, doivent également être considérées comme des exercices et des preuves de faisabilité des applications de la réalité virtuelle en psychologie. Ces trois études sont en effet le résultat d'un travail conjoint entre le développement informatique, d'une part, et les sciences cognitives, d'autre part. Chacune de ces expérimentations explore une application possible de la technologie en psychologie et en propose un paradigme d'utilisation. Les méthodes, matériels et analyses de ces expérimentations empiriques sont détaillés dans la présente partie. Leurs résultats sont décrits dans la partie suivante et sont ensuite discutés dans une partie théorique. Le choix a été fait de rendre entière chaque partie : le matériel utilisé, lorsque commun à plusieurs parties, est répété pour chaque protocole expérimental afin d'en permettre une lecture claire et indépendante. Les parties Discussion de chaque expérimentation suivent, au contraire, un raisonnement continu entre les différentes études afin de pouvoir aller plus loin dans la lecture des résultats. Des analyses transversales entre les différentes expérimentations ont également été réalisées, elles constituent elles aussi une sous-partie indépendante de chaque section. L'ensemble de ces résultats empiriques ainsi que leurs discussions théoriques fait ensuite l'objet d'une synthèse dans la section Conclusion destinée à rendre compte de l'objectif de l'étude ainsi que d'en proposer des perspectives futures, théoriques et empiriques.

3.1. Neuroprésence : étude sur les fonctions exécutives

Neuroprésence est la première étude de la démarche intellectuelle du travail doctoral. Il s'agit d'une expérimentation destinée à analyser les dynamiques en jeu entre les différents facteurs humains lors de l'implémentation en réalité virtuelle d'un test de neuropsychologie classique. Pour ce faire, l'étude compare deux groupes expérimentaux : un groupe réalisant un test de neuropsychologie classique au format papier-crayon, et un groupe réalisant le même test implémenté en réalité virtuelle. L'analyse de ces résultats a poussé à des réflexions théoriques et méthodologiques profondes et ont largement posé les bases des protocoles expérimentaux suivants. L'étude Neuroprésence est, au moment où ces lignes sont écrites, soumise dans une revue scientifique à comité de lecture sous le nom de *Virtual reality promotes men's executive control performance but not women's : how human factors could explain this phenomenon*. Les co-auteurs sont cités dans l'ordre suivant : Arthur Maneuvrier, Hadrien Ceyte, Patrice Renaud, Rémy Morello, Philippe Fleury, Leslie Marion Decker. Les remerciements vont à plusieurs personnes : Nicolas Lefevre, Jérôme Nicolle et Axel Tillier pour leur aide quant à la réalisation dans Unity3D et la programmation en C# de l'étude, et Charline Madelaine, pour son regard de neuropsychologue quant aux évaluations cognitives.

3.1.1. Problématisation

3.1.1.1. Objectifs

L'objectif de cette étude est double. Tout d'abord, il s'agit de comparer les performances cognitives des hommes et des femmes lors d'un test bien connu des fonctions exécutives frontales, le Wisconsin Card Sorting Test (Berg, 1948), effectué soit en modalité papier-crayon, soit en modalité réalité virtuelle. Il s'agit donc de comparer une évaluation classique des fonctions exécutives par rapport à une évaluation virtuelle de celles-ci, tout en prenant en compte les potentielles différences liées au genre soulevées dans la partie théorique. Le deuxième objectif est de déterminer le rôle de plusieurs facteurs humains – cybermalaises, dépendance au champ, genre, sentiment de présence, pratique des jeux vidéo – comme facteurs contribuant à la performance exécutive en modalité virtuelle. Il s'agit donc d'évaluer plus particulièrement au sein du groupe réalisant l'évaluation en réalité virtuelle les variables impactant la performance au test de fonctions exécutives. Cette étude comporte également un objectif annexe exploratoire, dont le but est de comparer le niveau de stress de laboratoire (Starcke et al., 2016) ressenti par les individus au sein de chacune des modalités de présentation, et l'impact sur la performance de ce potentiel stress. La performance au Wisconsin Card Sorting Test a été choisi comme variable dépendante

de performance car il s'agit d'un outil très connu et largement répandu pour évaluer l'efficacité globale du contrôle exécutif et moteur (Barceló et al., 1997; Kopp et al., 2019; Lange et al., 2018). Ce test exploite l'inhibition, la persévérance, la pensée abstraite et la mise à jour. Il est connu pour révéler des dysfonctionnements du lobe frontal ou des maladies neurodégénératives, ce qui en fait un bon candidat pour la mise en œuvre d'un test virtuel, notamment dans le but d'y incorporer la dimension écologique.

3.1.1.1.1. Stress de laboratoire

L'effet de stress de laboratoire est un biais bien connu des expérimentations en psychologie. Le stress, au sens large, apparaît généralement lorsqu'une demande dépasse la capacité de régulation d'un organisme (Dickerson & Kemeny, 2004). Le stress provoque des réponses psychologiques, physiologiques et comportementales pouvant affecter négativement les capacités cognitives, notamment les fonctions exécutives (Starcke et al., 2016). Le stress de laboratoire peut être défini ainsi lorsque provoqué dans un contexte d'observation et d'évaluation, que ce soit dans des buts de recherche ou de diagnostics. Il semble donc intéressant de voir si la réalité virtuelle, en cachant l'expérimentateur et le laboratoire au participant – notamment en le transportant ailleurs, dans l'environnement virtuel là où il n'y a ni expérimentateur ni laboratoire – peut permettre de réduire ce stress.

3.1.1.1.2. Hypothèses

Deux séries d'hypothèses expérimentales sont émises pour cette étude empirique. La première, destinée à valider le test virtuel, est qu'il n'existe pas d'effets de la modalité de présentation du Wisconsin Card Sorting Test sur la performance des individus. Puisqu'elles n'existent pas dans le test traditionnel (K. B. Boone et al., 1993), nous émettons également l'hypothèse qu'il n'existe pas de différence de performance entre les genres dans la modalité papier-crayon. Par contre, nous considérons que les hommes sont favorisés par la technologie et nous émettons donc l'hypothèse d'un effet du genre dans la modalité réalité virtuelle. La deuxième série d'hypothèse correspond aux attentes a priori d'association entre les variables au sein de la modalité réalité virtuelle, associations plus clairement représentées graphiquement (Tableau 1). Concernant la comparaison sur le niveau de stress ressenti, nous émettons l'hypothèse que les participants testés en réalité virtuelle, non confrontés au regard et à la présence de l'expérimentateur durant l'évaluation sont moins stressés que ceux testés traditionnellement.

	Performance cognitive	Sentiment de présence	Cybermalaises	Pratique des jeux vidéo	Dépendance au champ
Performance cognitive					
Sentiment de présence	+				
Cybermalaises	-	-			
Pratique des jeux vidéo	+	+	-		
Dépendance au champ	-	-	+	-	
Genre féminin	-	-	+	-	+

Tableau 1. – Représentation graphique des hypothèses d'association et de direction dans l'étude Neuroprésence. Un « + » signifie une hypothèse de corrélation positive et un « - » signifie une hypothèse de corrélation négative.

3.1.2. Matériels & méthodes

3.1.2.1. Participants

109 jeunes adultes ont été recrutés localement sur le campus universitaire par des annonces publiques. Ils ont été divisés en deux groupes pour lesquels les parités de genre d'âge ont été contrôlées : un groupe modalité réalité virtuelle composé de 28 femmes (24.9 ± 4.3 ans) et 26 hommes (25.8 ± 3.2 ans) et un groupe papier-crayon composé de 28 femmes (24.7 ± 3.2 ans) et 27 hommes (24.6 ± 3.4 ans). Une conception intra-sujet (mesures répétées) n'a pas été retenue pour éviter tout effet d'apprentissage du test d'une mesure à l'autre qui aurait provoqué un effet seuil. En effet, le Wisconsin Card Sorting Test repose sur un principe de découverte de règles de fonctionnement. Une fois ces règles trouvées, et même en changeant de modalité (réalité virtuelle ou papier-crayon), le test ne laisse plus de place à l'erreur. Les critères d'exclusion de l'expérimentation comprenaient : i) avoir moins de 18 ans et plus de 35 ans, ii) la présence actuelle ou passée de troubles neurologiques ou psychiatriques, iii) la présence de déficiences visuelles ne permettant pas la vision stéréoscopique ou une vision non corrigée, iv) la présence de déficiences motrices ne permettant pas l'utilisation des commandes manuelles.

Cette recherche a été réalisée conformément aux principes de la Déclaration d'Helsinki (World Medical Association, 2013) et a été approuvée par le CLERS (Comité Local d'Ethique de la Recherche en Santé) de l'Université de Caen Normandie. Le consentement éclairé de chaque participant a été obtenu. Le formulaire de consentement contenait des informations claires sur la nature volontaire de l'étude et le contenu de celle-ci. Les participants ont été invités à remplir et à signer le formulaire de consentement éclairé afin de reconnaître la volonté de se porter volontaire en tant que participants. Bien qu'ils aient été informés de la possibilité d'arrêter l'expérimentation à tout moment et ce sans aucune justification, aucun participant n'a choisi de le faire.

3.1.2.2. Matériels

3.1.2.2.1. *Test de la Baguette et du Cadre*

La dépendance au champ des participants était évaluée par une version virtuelle (Annexe 3) du Test de la Baguette et du Cadre (Rod and Frame Test) de Witkin et al., (1962). La version virtuelle est une version commerciale intégrée par la société Virtualis dans leur logiciel RVR. Les mécanismes classiques du test traditionnel sont repris pour casque de réalité virtuelle : placés en position assise droite sans toucher le dossier de la chaise et équipés d'un casque HTC-Vive leur proposant un cadre incliné latéralement de 18 degrés, les participants devaient aligner, via un joystick classique (X-Box), une baguette initialement inclinée de 27 degrés par rapport à la verticale terrestre (0 degré). 16 essais ont été réalisés à partir de combinaisons d'ordre équilibré de deux inclinaisons de la baguette droite et gauche (-27 / +27 degrés) et de deux inclinaisons du cadre, droit et gauche (-18 / +18 degrés). Pour chaque essai, l'erreur absolue (en degrés) par rapport à la verticale terrestre était enregistrée. Le degré de dépendance visuelle a été quantifié à l'aide de l'erreur absolue moyenne. Plus l'erreur absolue moyenne est élevée, plus la verticale subjective est influencée par le cadre incliné, et donc plus le sujet est dépendant à l'égard du champ.

3.1.2.2.2. *Wisconsin Card Sorting Test*

Le Wisconsin Card Sorting Test (Berg, 1948) a été réalisé, indépendamment des groupes expérimentaux, soit en version traditionnelle papier-crayon soit en version réalité virtuelle. Dans les deux modalités, quatre cartes de référence sont présentées au participant. Chaque carte correspond à une combinaison possible de trois caractéristiques : une couleur (rouge, bleu, vert, jaune), une forme (triangle, cercle, carré, croix), et un nombre (1, 2, 3, 4). Ces quatre cartes restent toujours visibles au participant. Dans la modalité traditionnelle, l'expérimentateur pioche alors une cinquième carte et la présente au participant. Celui-ci est alors invité à faire correspondre la nouvelle

carte avec une des quatre cartes de référence. Après avoir donné une réponse en déplaçant la carte cible sous une des cartes références et ceci sans aucun indice concernant la règle d'association, le participant reçoit un retour positif (« oui ») ou négatif (« non ») de la part de l'expérimentateur. Lorsque le participant répond correctement dix fois de suite, la règle est considérée comme acquise. Lorsqu'une règle est trouvée, l'expérimentateur passe, sans en avertir le sujet, à la règle suivante sans modifier les cartes de référence. Le test se termine lorsque les six règles (association par couleur, par forme, par nombre, répétées deux fois) sont trouvées ou lorsque le jeu de 128 cartes est épuisé. La performance au Wisconsin Card Sorting Test a été évaluée sur la base d'un score composite combinant : (A) le nombre de règles trouvées sur les six règles totales, (B) le nombre d'essais nécessaires pour trouver les six règles, et (C) le nombre total d'erreurs, comme suit : $[(A \times 10) + (B) + (C)]$. Puisque le nombre d'erreurs est codé positivement, un score plus faible indique une meilleure performance.

Concernant la modalité virtuelle, une version réalité virtuelle du Wisconsin Card Sorting Test a été conçue pour la présente étude et optimisée pour le casque HTC-Vive (1080 x 1200 pixels par œil, 90 Hz, 110 degrés de champ de vision). L'environnement virtuel représentait un environnement de type Far West américain afin d'utiliser un arrière-plan culturellement connu sans pour autant opter pour un style hyperréaliste (Figure 11). Le moteur de rendu utilisé était Unity3D et le langage de programmation le C#. L'ordinateur supportant l'expérimentation était équipé d'une carte graphique NVIDIA GTX-1080, de 16 Go de RAM et d'un Intel Core 5 permettant une fréquence d'images constante et bloquée à 90 images par seconde. Un extrait vidéo de la passation peut être consultée sur le site web Maneuvrier (2020). De la même manière que dans la modalité traditionnelle, le participant était assis sur une chaise, mais virtuellement assis sur un chariot mobile naviguant dans un environnement audiovisuel. Les quatre cartes de référence étaient présentées sur les coins d'un chariot se déplaçant devant le participant, et la cinquième carte, la carte cible, apparaissait au milieu du chariot de manière à être équidistante des cartes de référence (au lieu de « GO » indiquant le début de l'expérimentation dans la Figure 11). Les participants ont effectué le test en manipulant un laser virtuel via un contrôleur entièrement suivi qui leur permettait, à l'aide de légers déplacements visuo-manuels, d'associer les cartes cibles avec les cartes de référence. Le retour d'information sur les réponses a été réalisé en mode audiovisuel sous la forme de signaux visuels de couleur rouge (négatif) ou verte (positif) et de bref signaux acoustiques connus culturellement comme étant la marque d'une réussite ou d'un échec. Ces deux modalités audiovisuelles ont été utilisées pour éviter des mots tels que « vrai / faux » ou « oui / non » afin de ne pas perturber le sentiment de présence du participant venant d'une voix non ancrée virtuellement. La note de performance a été obtenue exactement de la même manière que

dans la modalité papier-crayon. L'exécution des deux modalités du Wisconsin Card Sorting Test a suivi la même procédure originale et a été validée par un neuropsychologue clinicien professionnel.



Figure 11. – Vue première personne de la modalité réalité virtuelle du Wisconsin Card Sorting Test de l'étude Neuroprésence

3.1.2.2.3. Questionnaires

Le questionnaire sur l'Etat de Présence, version française validée du Presence Questionnaire de (Witmer & Singer, 1998) a été utilisé (Annexe 1), tous les sujets étant de langue maternelle française. Celui-ci a été choisi afin de rendre compte d'un sentiment de présence comparable avec le plus grand nombre d'études en réalité virtuelle. Les items évaluant l'haptique de celui-ci n'ont pas été incorporés dans l'étude, l'environnement virtuel n'utilisant pas de gants de données ou autres moyens de retours haptiques. Le Questionnaire sur les Cybermalaises a également été utilisé (Bouchard et al., 2007), version française validée et restructurée (Annexe 2) du Simulator Sickness Questionnaire original de Kennedy et al. (1993). Enfin, deux questions subsidiaires sur le format d'une échelle de Likert ont été ajoutées à la série de questionnaire. Elles prenaient les formes suivantes : « A quel point vous êtes-vous senti(e) stressé(e) par le fait d'être observé ?

De 1 (*Pas du tout*) à 7 (*Immensément*) » et « A quelle fréquence jouez-vous aux jeux vidéo ? De 1 (*Jamais*) à 7 (*Tous les jours*) ». Les scores à ces deux questions permettaient d'établir respectivement la variable stress de laboratoire et pratique des jeux vidéo.

3.1.2.3. Procédure

Lorsque les participants entraient dans la salle de passation, ils étaient invités à lire attentivement le formulaire de consentement puis à le signer si celui-ci leur convenait. Ils étaient libres de poser toutes les questions voulues à l'expérimentateur. Une fois le consentement signé, les participants étaient assignés dans l'une ou l'autre des deux modalités (réalité virtuelle ou papier-crayon) selon une pseudo-randomisation a priori destinée à préserver un ratio d'hommes et de femmes ainsi que d'âges équivalent. Le test était alors réalisé selon la modalité de présentation. Les participants du groupe réalité virtuelle étaient invités, à la suite de la passation du Wisconsin Card Sorting Test virtuel, à réaliser sur ordinateur les questionnaires sur l'Etat de Présence et sur les Cybermalaises. Tous les participants répondaient ensuite (de façon auto-administrée sur ordinateur) à la question concernant le stress ressenti causé par le fait d'être observé ainsi que la question sur la pratique des jeux vidéo. Toutes les réponses subjectives données (questionnaires et questions) étaient donc auto-administrées de façon anonymes (l'expérimentateur ne voyait pas les réponses du participant) afin de minimiser les biais de désirabilité sociale. Enfin, les participants de la modalité réalité virtuelle réalisaient le Test de la Baguette et du Cadre virtuel. Ils étaient ensuite invités à poser d'éventuelles questions sur la passation, remerciés, puis quittaient le laboratoire.

3.1.2.4. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant R, version 1.2.5001-3, ainsi que JASP, version 0.12.1. Une ANOVA mixte bidirectionnelle a été utilisée pour comparer les effets de la modalité (réalité virtuelle et papier-crayon) et du sexe (hommes et femmes) ainsi que leur interaction sur les performances au Wisconsin Card Sorting Test, suivie d'une analyse post-hoc avec correction de Tuckey. Le test de Levene a été utilisé pour vérifier que les variances étaient égales pour tous les échantillons. Au sein du groupe réalité virtuelle, le coefficient de corrélation de Pearson r a été utilisé pour explorer les associations entre les variables quantitatives des facteurs humains évalués (performance cognitive, dépendance au champ, sentiment de présence, cybermalaises, pratique des jeux vidéo, genre, stress ressenti). Considérant que les prédictions a priori étaient directionnelles, des tests unilatéraux ont été utilisés. Ensuite, une analyse par composantes principales avec rotation oblique Promax (valeurs propres retenues lorsque supérieures à 1) a été effectuée pour mieux saisir la relation entre les facteurs humains. Enfin, un test t de

Student pour échantillons indépendants a été utilisé afin de comparer les moyennes de coordonnées sur les composants principaux entre hommes et femmes. Des régressions linéaires (méthode entrée) ont alors été utilisées pour investiguer les apports de chacune des variables sur la performance, mais aussi sur chacun des facteurs humains retenus. Concernant l'objectif annexe sur le stress de laboratoire, un test *t* de Student pour mesures indépendantes a été réalisé pour comparer le stress ressenti selon les modalités de présentation du Wisconsin Card Sorting Test, ainsi qu'une régression linéaire pour en analyser l'effet sur la performance cognitive. Le seuil de significativité a été fixé à .05 et une tendance à la signification était discutée entre .05 et .1. Les tailles d'effet ont été rapportés par le coefficient *r* de Pearson pour les corrélations, le η^2 (Eta carré) pour les ANOVAs, le R^2 et f^2 pour les régressions linéaires, et le *d* de Cohen pour les tests *t* de Student.

3.2. Spatioprésence : étude sur la cognition spatiale

Spatioprésence est la deuxième étude de cette thèse doctorale et peut être considérée comme la voûte angulaire de la démarche empirique. Cependant, un biais expérimental s'est glissé dans cette étude qu'il convient d'énoncer dès à présent. En effet, si le but premier de l'étude était d'analyser la contribution de chacun des facteurs humains soulevés lors de l'implémentation virtuelle sur la performance à un test de cognition spatiale, il existait un objectif secondaire : l'évaluation de l'impact du contexte narratif sur le sentiment de présence ressenti des participants. Ainsi, 50 participants devaient en amont de la présentation lire une double page contenant des informations pertinentes sur l'environnement virtuel à venir (des informations historiques détaillées sur la Rome Antique du IV^{ème} siècle), et 48 participants devaient eux lire une présentation contrôle non pertinente (des informations historiques détaillées sur la Normandie au XVIII^{ème} siècle). Le but était de comparer l'effet d'un ancrage du contenu narratif sur les différents facteurs humains en question. Cependant, et malgré des consignes écrites claires (« il n'y a pas de limite de temps mais essayez d'être le plus rapide possible »), les participants ayant reçu des informations détaillées pertinentes sur la Rome Antique sont restés largement plus longtemps dans l'environnement virtuel que ceux du groupe contrôle (240 secondes \pm 72 contre 309 secondes \pm , $t = 3.369$, $p = .001$). Cette plus longue exposition s'est révélée être une variable parasite forte : toutes les différences interindividuelles s'expliquant par la durée d'immersion, les différences inter sujets à observer sur la performance, la présence, ou tout autre variable disparaissaient des analyses sous le poids de cet effet. Il devenait donc non seulement impossible d'analyser l'effet du contexte narratif, mais aussi de tout autre variance liée à la performance de cognition spatiale. Le choix a donc été fait de séparer la cohorte : l'étude Spatioprésence, qui analyse les facteurs humains en réalité virtuelle et leur lien sur la performance, est donc basée sur les 48 participants issus du groupe recevant des informations non pertinentes et donc non impactés par le biais expérimental. La seconde moitié, Nav(i)r, est présentée dans une partie suivante. L'étude Spatioprésence est, au moment où ces lignes sont écrites, acceptée pour publication dans *Frontiers in Virtual Reality* sous le nom de *Presence promotes performance on a virtual spatial cognition task : impact of human factors on virtual reality assessment* (Maneuvrier et al., 2020). Les co-auteurs sont : Arthur Maneuvrier, Leslie Marion Decker, Hadrien Ceyte, Philippe Fleury et Patrice Renaud. Les remerciements vont à l'intégralité de l'équipe Plan de Rome (Nicolas Lefevre, Jérôme Nicolle, Charlie Morineau, Axel Tillier et Sophie Madeleine) pour la constitution des modèles 3D de la Rome Antique ayant largement facilité la création de l'environnement virtuel (Figure 12).



Figure 12. – Vue première personne de l'environnement virtuel de l'étude Spatioprésence.

3.2.1. Problématisation

3.2.1.1. Objectifs

L'objectif principal de cette étude est d'analyser la relation entre sentiment de présence et performance lors d'un test de cognition spatiale. Le second objectif est d'analyser le potentiel effet modérateur des différents facteurs humains (cybermalaises, pratique des jeux vidéo, dépendance au champ, genre) sur chacun des deux concepts ainsi que sur leur relation. La cognition spatiale a été choisie car il s'agit de tests largement évoqués et réalisés en réalité virtuelle, notamment pour l'investigation de processus d'orientation et de navigation à grande échelle dont la dimension écologique ne peut être rendue autrement en laboratoire (Cogné et al., 2017; Parsons, 2015). Les dysfonctionnements de ces processus pouvant être révélateurs de maladies neurodégénératives (Allison et al., 2016; Cogné et al., 2017), les tests de cognition spatiale sont de bons candidats pour la mise en œuvre d'un test virtuel, notamment dans le but d'y incorporer une dimension écologique.

3.2.1.2. Hypothèses

L'hypothèse principale de cette étude est que le sentiment de présence favorise la performance de cognition spatiale, et que les autres facteurs humains (cybermalaises, genre, dépendance au champ, pratique des jeux vidéo) modèrent cette relation. Afin de tester cette seconde partie, nous

émettons des hypothèses secondaires concernant les relations et les associations entre les différentes variables sur la base de données provenant de la littérature (Tableau 2).

	Performance de cognition spatiale	Sentiment de présence	Cybermalaises	Pratique des jeux vidéo	Dépendance au champ
Performance de cognition spatiale					
Sentiment de présence	+				
Cybermalaises	-	-			
Pratique des jeux vidéo	+	+	-		
Dépendance au champ	-	-	+	-	
Genre féminin	-	-	+	-	+

Tableau 2. – Représentation graphique des hypothèses d'association et de direction dans l'étude Spatioprésence. Un « + » signifie une hypothèse de corrélation positive et un « - » signifie une hypothèse de corrélation négative.

3.2.2 Matériels & méthodes

3.2.2.1. Participants

48 jeunes adultes dont 24 femmes (20.2 ± 2.8 ans) et 24 hommes (20.4 ± 2 ans) ont été recrutés localement en première et deuxième année de psychologie à l'université par annonces publiques. Les critères d'exclusion étaient : i) avoir moins de moins de 18 ans ou de plus de 35 ans, ii) présenter des troubles neurologiques ou psychiatriques actuels ou passés, iii) présenter des déficiences visuelles ne permettant pas la vision stéréoscopique ou une vision non corrigée, iv) présenter des déficiences motrices ne permettant pas l'utilisation de commandes manuelles. Le Comité d'éthique de la recherche en éducation et en psychologie a validé l'expérimentation. Tous les participants ont signé un formulaire de consentement éclairé avant la collecte des données, et la procédure d'Helsinki (World Medical Association, 2013) a été strictement appliquée. Bien

qu'ils aient été informés qu'ils pouvaient arrêter l'expérience à tout moment, aucun d'entre eux n'a choisi de le faire. Un participant a été exclu de l'étude pour données aberrantes.

3.2.2.2. Matériels

3.2.2.2.1. Test de la Baguette et du Cadre

La dépendance au champ des participants était évaluée par une version virtuelle du Test de la Baguette et du Cadre (Rod and Frame Test) de Witkin et al. (1962). La version virtuelle est une version commerciale intégrée par la société Virtualis dans leur logiciel RVR (Annexe 3). Les mécanismes classiques du test traditionnel sont repris pour casque de réalité virtuelle : placés en position assise droite sans toucher le dossier de la chaise et équipés d'un casque HTC-Vive leur proposant un cadre incliné de latéralement de 18 degrés, les participants devaient aligner, via un joystick classique (X-Box), une baguette initialement inclinée de 27 degrés par rapport à la verticale terrestre (0 degré). 16 essais ont été réalisés à partir de combinaisons d'ordre équilibré de deux inclinaisons de la baguette droite et gauche (-27 / +27 degrés) et de deux inclinaisons du cadre, droit et gauche (-18 / +18 degrés). Pour chaque essai, l'erreur absolue (en degrés) par rapport à la verticale terrestre a été enregistrée. Le degré de dépendance visuelle a été quantifié à l'aide de l'erreur absolue moyenne. Plus l'erreur absolue moyenne est élevée, plus la verticale subjective est influencée par le cadre incliné, et donc plus le sujet est dépendant du champ.

3.2.2.2.2. Pratique des jeux vidéo

La variable pratique des jeux vidéo a été constituée à partir du produit de deux sous-éléments. Premièrement une simple échelle de Likert sur 7 points destinée à évaluer la fréquence de jeu : « A quelle fréquence jouez-vous aux jeux vidéo ? De 1 (*Jamais*) à 7 (*Tous les jours*) ». Deuxièmement, une question à réponses multiples afin de déterminer le type de jeux auxquels jouent les participants : « Lorsque vous jouez à des jeux vidéo, à quel genre de jeux jouez-vous habituellement (cochez de zéro à trois des genres de jeux auxquels vous jouez le plus) ? ». Les réponses possibles étaient : « Stratégie en temps réel et arène de combat en ligne multi-joueurs / Jeux de simulation / Puzzles & Arcade / Jeux de tirs première personne / Jeux de plateforme / Jeux de rôle et d'aventures ». Chaque type de jeux vidéo était suivi de quelques exemples destinés à guider les participants ne connaissant pas ces étiquettes. Par exemple, jeux de tirs première personne était suivi de « Counter Strike, Overwatch, Apex Legends, Call of Duty, Fornite... », alors que Puzzle & Arcade était suivi de « Candy Crush, Fruits Ninja, Space Invader, Pac-Man, Overcooked... ». Les participants qui déclaraient jouer à une des trois catégories de jeux intensifs (stratégie en temps réel et arène de combats en ligne multijoueur / jeux de tirs première personne

/ jeux de rôle et d'aventure) recevaient le ratio 2, alors que les participants qui déclaraient ne jouer à aucun de ces jeux ou à aucun jeu recevaient le ratio 1. La variable pratique des jeux vidéo a donc été constituée en multipliant le type de jeux pratiqué avec la fréquence de jeux vidéo rapportée.

3.2.2.2.3. *Test de cognition spatiale*

Un environnement virtuel a été construit à l'aide du moteur Unity3D et du langage de programmation C# par les auteurs de l'étude pour le casque de réalité virtuelle HTC-Vive (1080 x 1200 pixels par œil, 90 Hz, 110 degrés de champ de vision), en utilisant l'API et le SDK d'OpenVR et de SteamVR (Figure 3). Le système de réalité virtuelle fonctionnait sur un ordinateur utilisant une carte graphique NVIDIA GTX-1080, 16 Go de RAM et un Intel Core 5, ce qui a permis d'assurer un taux de rafraîchissement constant de 70 images par seconde. Un extrait vidéo de la vue première personne de l'environnement virtuel est disponible sur le site web Maneuvrier (2020). Des contrôleurs manuels HTC-Vive étaient également utilisés : les participants se déplaçaient dans l'environnement par téléportation : ils appuyaient sur un bouton pour pointer le sol dans un rayon de 4 mètres, puis relâchaient le bouton pour se déplacer vers le point. Cette technique de locomotion a été choisie afin de réduire l'incidence d'un flux visuel incohérent et donc prévenir l'apparition de cybermalaises (Clifton & Palmisano, 2019). Les participants pouvaient également utiliser ces manettes pour ouvrir les portes en touchant ces dernières avec la représentation virtuelle du contrôleur.

L'environnement de test était suffisamment grand pour procurer aux participants un sentiment de liberté mais était en réalité un parcours guidé comportant 10 intersections (Figure 13) où les participants devaient choisir entre deux directions représentées par deux portes. Les bonnes portes, représentant l'itinéraire à suivre, pouvaient être ouvertes alors que les mauvaises ne le pouvaient pas. Ceci a été fait pour donner aux participants un sentiment de liberté (et de présence) sans possibilité de se perdre dans l'environnement. Chaque intersection comportait un repère visuel unique (par exemple une statue, une fontaine, un arbre ...) destiné à améliorer l'orientation mais aussi à permettre une évaluation a posteriori. L'environnement comprenait différents atouts afin d'augmenter le sentiment de présence du participant et contribuer à la fluidité de la procédure. Tout d'abord, un son interactif a été inclus avec les portes : ouvrir une bonne porte émettait un son de porte, tout comme essayer d'ouvrir une porte fermée émettait un son concordant. Deuxièmement, deux sons ambiants (vent, oiseaux) étaient joués en boucle en arrière-plan. Enfin, cer-

tains oiseaux artificiels intelligents volaient dans le ciel (suffisamment loin pour ne pas être distracteurs) de façon pseudo-aléatoire, émettant des sons d'oiseaux. Tous les sons, à l'exception des sons ambiants, étaient spatialisés en 3D et rendus en stéréoscopie.

L'évaluation de la performance de cognition spatiale a été inspirée par celle proposée par Cushman et al. (2008). Après une première visite guidée dans l'environnement virtuel (« Suivez les panneaux sur le chemin. Il n'y a pas de limite de temps, mais essayez d'être le plus rapide possible »), les participants devaient répondre dans l'environnement virtuel à différents items : reconnaissance de photos (des photos fausses et vraies de l'environnement étaient montrées, ils devaient dire si ces images étaient extraites de l'environnement virtuel visité ou non), reconnaissance du chemin (les participants devaient dire s'ils avaient pris à gauche ou à droite sur une photo d'intersection) position de la photo (les participants devaient replacer des photos de l'environnement sur un continuum du « début » à la « fin » de la visite), position de la vidéo (les participants devaient replacer des vidéos de l'environnement sur un continuum du « début » à la « fin » de la visite). Les participants étaient ensuite virtuellement replacés au début de l'environnement et devaient refaire l'itinéraire réalisé précédemment, mais sans les balises pour les guider (« Vous devez maintenant refaire la visite, mais sans les panneaux pour vous aider. Il n'y a pas de limite de temps, mais essayez d'être le plus rapide possible »). Enfin, un ultime élément a été mesuré : le rappel libre (« Dénombrer, à haute voix, chaque élément de l'environnement qui vous a aidé à vous repérer dans l'environnement »). Chacune de ces items comportait 10 questions qui permettaient une note de 0 (aucune bonne réponse) à 1 (uniquement des bonnes réponses). Deux éléments de Cushman et al. (2008) n'ont pas été intégrés dans cette étude : le dessin d'itinéraire, où les participants doivent dessiner une carte à l'échelle de l'itinéraire, et l'auto-localisation, où les participants, confrontés à des images extraites de l'environnement, doivent pointer dans leur direction. Le choix a été fait de ne pas intégrer le dessin d'itinéraire en raison de son évaluation arbitraire lorsque l'itinéraire n'est pas exactement composé de segments droits, comme c'était le cas dans Cushman et al. (2008). Dans notre expérience, l'environnement n'était pas composé de segments mais de zones : les participants ont beaucoup plus de liberté dans leur navigation jusqu'à ce qu'ils rencontrent un point d'étranglement, ce qui permet une meilleure dimension écologique, mais rend l'évaluation du dessin plus problématique. En effet, pour proposer une évaluation méthodologique, le dessin du parcours aurait nécessité une comparaison avec le parcours de chacun, qui pourrait éventuellement être automatisée à l'avenir, mais qui n'a pu être faite dans cette étude. Quant à l'auto-localisation elle n'a pas été intégrée en raison de l'extrême difficulté et du manque de résultats mis en évidence par les résultats préliminaires. Cette difficulté extrême pourrait venir en réalité virtuelle de l'éventuelle inadéquation entre la direction du mouvement et

la position du corps lors de l'utilisation de la téléportation. En effet, comme les participants se déplacent en pointant à l'aide des contrôleurs manuels, ils n'ont pas toujours à faire face à la direction dans laquelle ils se dirigent, ce qui peut expliquer l'absence de résultats et ainsi entraîner le manque de pertinence de l'item d'auto-orientation, en plus d'induire un effet démoralisant pour les participants.



Figure 13. – Vue aérienne de l'environnement virtuel de Spatioprésence. La ligne verte représente l'itinéraire correct, et les lignes rouges représentent les voies menant à des portes fermées. Les astérisques représentent l'emplacement des points d'étranglement associés aux repères visuels, qui étaient également l'emplacement des signes conduisant le participant dans la phase d'apprentissage. Le "D" représente l'emplacement de départ et le "F" l'emplacement de fin.

Le nombre de mauvaises portes que les participants ont essayé d'ouvrir lors de la deuxième visite a été noté de façon continue de 0 (aucune mauvaise porte n'a été tentée) à 1 (toutes les mauvaises portes ont été tentées), avec un score de 0.5 indiquant que la moitié des portes a été essayée. Les compétences de navigation étaient évaluées de 0 à 1 par le ratio suivant :

$$\frac{\text{Durée de la deuxième visite}}{\text{Durée des deux visites}}$$

L'intégration de la durée de la première visite permet de contrôler les facteurs ergonomiques et donc d'évaluer plus précisément les performances de navigation spatiale. Le score final de la performance de la cognition spatiale a été obtenu en additionnant chaque sous-élément. Les erreurs ont été codées positivement mais inversées pour plus de clarté : un score faible indique une performance inférieure.

3.2.2.2.4. Questionnaires

Le questionnaire sur l'Etat de Présence, version française validée du Presence Questionnaire de (Witmer & Singer, 1998) a été utilisé, tous les sujets étant de langue maternelle française (Annexe 1). Le questionnaire sur l'Etat de Présence a été choisi afin de rendre compte d'un sentiment de présence comparable avec le plus grand nombre d'études. Les items évaluant l'haptique de celui-ci n'ont pas été incorporés dans l'étude, l'environnement virtuel n'utilisant pas de gants de données ou autres moyens de retours haptiques. Le Questionnaire sur les Cybermalaises (Annexe 2) a également été utilisé (Bouchard et al., 2007), version française validée et restructurée du Simulator Sickness Questionnaire original de Kennedy et al. (1993).

3.2.2.3. Procédure

Lorsque les participants entraient dans la salle de passation, ils étaient invités à lire attentivement le formulaire de consentement puis à le signer si celui-ci leur convenait. Ils étaient libres de poser toutes les questions voulues à l'expérimentateur. Une fois le consentement signé, les participants étaient équipés du casque HTC-Vive et étaient invités à réaliser une première fois le Test de la Baguette et du Cadre. Une fois celui-ci terminé, ils débutaient un tutoriel leur permettant de prendre en main les contrôles de l'environnement de test. Ce tutoriel d'une durée de 3 à 4 minutes leur permettait d'apprendre à se déplacer, à ouvrir les portes, ainsi que la possibilité de rencontrer des portes pouvant s'ouvrir et des portes ne pouvant pas s'ouvrir. A la fin du tutoriel, les participants étaient invités, s'ils le désiraient, à recommencer ce dernier. Aucun participant n'a choisi de recommencer le tutoriel. Une fois l'interface prise en main, les participants réalisaient le test de cognition spatiale. Ils devaient ensuite répondre aux questionnaires sur l'Etat de Présence et sur les Cybermalaises, puis aux questions sur la fréquence de pratique des jeux vidéo ainsi que des types de jeux vidéo pratiqués. Ils passaient ensuite à nouveau le Test de la Baguette et du Cadre. La moyenne des deux essais du test servait de score de référence de dépendance au champ. Les participants étaient ensuite invités à poser d'éventuelles questions sur la passation, remerciés, puis quittaient le laboratoire.

3.2.2.4. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide de la version 0.2.12.1 de JASP. Des statistiques descriptives ont été réalisées sur les scores de cognition spatiale, notamment l'analyse de fiabilité basée sur l'oméga de McDonald's, ainsi que sur la variable expérience des jeux vidéo. Le coefficient de corrélation de Pearson r a été utilisé pour explorer les associations entre les différentes variables sélectionnées (i.e : performance de cognition spatiale, sentiment de présence, cybermalaises, genre, pratique des jeux vidéo et dépendance au champ). Considérant que les prédictions a priori étaient directionnelles, des tests unilatéraux ont été utilisés pour les corrélations. Compte tenu de la taille relativement petite de l'échantillon, les variables non corrélées aux autres n'ont pas été retenues pour une analyse plus approfondie. Une analyse en composantes principales a été effectuée afin de mieux comprendre la variance entre les variables. Des régressions linéaires (méthode entrée) ont ensuite été utilisées pour évaluer le poids prédictif potentiel des variables et leurs possibles interactions sur chacune des variables provoquées : i) la performance à la tâche de la cognition spatiale, ii) le sentiment de présence et iii) les cybermalaises. Enfin, des analyses de médiation sur la relation présence-performance avec les variables potentiellement modératrices ont été effectuées. La multicolinéarité a été testée en utilisant des facteurs d'inflation de la variance. Le seuil de significativité a été fixé à .05 et une tendance à la significativité a été interprétée pour une valeur p comprise entre .05 et .1. Les tailles d'effet ont été rapportées par le coefficient r de Pearson pour les corrélations, le η^2 (Eta squared) pour les ANOVA et le R^2 et f^2 pour les régressions linéaires.

3.3. Nav(i)r : étude sur l'évolution de la dépendance au champ

L'étude Nav(i)r est la partie complémentaire de l'échantillon original de Spatioprésence, initialement destinée à évaluer l'impact du contexte narratif sur le sentiment de présence et la performance en réalité virtuelle. Cette performance, largement supérieure dans le groupe contexte narratif pertinent (informations historiques sur la Rome Antique) à cause de leur plus longue durée d'exposition, n'était plus possible à analyser sur la cohorte entière. Le choix a donc été fait d'utiliser cet échantillon complet sans mesure de la performance et dans des buts d'exploration et de contrôle. Les deux groupes expérimentaux originels ont donc été fusionnés en un seul groupe expérimental de 100 participants. La performance au test de cognition spatiale n'y est pas considérée comme une variable dépendante, et la durée d'exposition des participants a été contrôlée : il n'existe pas d'effet de cette dernière sur les variables étudiées. Plusieurs concepts sont donc explorés plus en détail lors de cette immersion en réalité virtuelle, conjointement avec les facteurs humains d'intérêt. Ces différents concepts sont l'évolution de la dépendance au champ durant l'exposition à l'environnement virtuel et ses effets sur la réaction à l'immersion, le sentiment de présence historique, et la pratique des jeux vidéo. La partie de cette étude sur l'évolution de la dépendance au champ constitue le manuscrit Nav(i)r qui est, au moment où ces lignes sont écrites, en phase de relecture par les différents co-auteurs : Arthur Maneuvrier, Leslie Marion Decker, Patrice Renaud, Philippe Fleury et Hadrien Ceyte. Elle fera l'objet d'une soumission scientifique durant l'automne 2020.

3.3.1. Problématisation

3.3.1.1. Objectifs

L'objectif premier de cette étude est d'analyser plus en détail la place de la dépendance au champ dans le cadre de la réalité virtuelle, et notamment son évolution face à l'immersion. Il s'agit d'examiner les liens entretenus entre cette évolution et les différents facteurs humains associés à la technologie : sentiment de présence, cybermalaises, pratique des jeux vidéo, genre, niveau de dépendance au champ initial. Il est en effet fortement possible que la simple mesure de la dépendance au champ ne soit pas suffisamment informative, et que l'investigation de la nature dynamique puisse permettre une meilleure appréhension de ses liens avec les différents composants de l'expérience utilisateur en réalité virtuelle, notamment avec les cybermalaises ou la présence. L'objectif secondaire de cette étude est, à travers l'immersion dans un environnement virtuel dans la Rome Antique d'explorer la possibilité d'une nouvelle forme de présence, la présence historique

ou présence dans le temps. Le but de cette analyse exploratoire est d'examiner la fiabilité et la pertinence de cette nouvelle sous-échelle de la présence, notamment en la mettant en lien avec les autres sous-échelles du Questionnaire sur l'Etat de Présence puis en comparant les capacités discriminatives de ces deux constructions. Enfin, le dernier objectif de cette étude est d'entrer plus en détail dans la mesure de la pratique des jeux vidéo afin de la rendre plus adéquate aux études en réalité virtuelle.

3.3.1.1.1. Evolution de la dépendance au champ

La possibilité d'une évolution de la dépendance au champ est une question épineuse. Witkin et al. (1971) suggèrent par exemple que cette dimension est stable et systématique une fois l'âge adulte atteint. Mais d'autres études plus récentes ont montré les possibilités d'évolution voire d'entraînement de la dépendance au champ (Pithers, 2002). Sans aller jusqu'à suggérer une totale inversion ou un effet puissant sur le long terme, il est fort probable qu'une certaine variabilité existe dans le niveau de dépendance au champ de chacun des individus. Bien que peu d'études traitent ce sujet, et puisqu'il semble qu'une plus grande dépendance au champ entraîne davantage de cinétoses (Kennedy, 1975), il est possible de suggérer une évolution de cette dépendance lorsqu'exposée à des environnements virtuels trop cinétogènes. Il est également possible de suggérer que cette évolution de la dépendance au champ corresponde à une compensation (une réduction de la dépendance lorsque cette stratégie se révèle porteuse d'effets négatifs) à l'origine des capacités d'habituation du système nerveux au conflit sensoriel (Howarth & Hodder, 2008). Concrètement, lorsque le système nerveux est exposé à des stimulations visuelles incohérentes et problématiques, celui-ci, pour réduire le conflit sensoriel, diminuerait la place accordée à ces dernières lors de l'intégration multisensorielle, entraînant de façon compensatoire une évolution de la dépendance au champ. Cet objectif propose donc d'étudier i) si cette évolution peut être engendrée par une immersion dans un environnement virtuel, ii) s'il existe des associations entre cette évolution et les différents facteurs humains de la réalité virtuelle.

3.3.1.1.2. La présence historique

La présentation en réalité virtuelle d'un environnement historique (ici la Rome Antique du IV^{ème} siècle) est l'occasion d'investiguer une potentielle nouvelle dimension du sentiment de présence, la présence historique, ou présence dans le temps. En effet, la réalité virtuelle s'est jusqu'ici largement intéressée aux trois dimensions de l'espace : on parle d'ailleurs de présence spatiale pour référer au fait que l'individu est immergé dans un endroit où il ne se situe pas physiquement. Pour autant, la dimension de temps est rarement évoquée. Il serait donc intéressant d'évaluer s'il est possible de procurer cette sensation « d'être dans le temps » autant que « d'être dans l'espace ».

Cette présence du temps pourrait être un outil d'investigation du passé, mais aussi être un outil d'apprentissage de l'histoire, académique ou non. Elle pourrait permettre d'évaluer le degré auquel un environnement historique permet de transporter son utilisateur, autant dans son époque que dans une autre. Elle pourrait par exemple permettre d'explorer ou de comparer les attentes et connaissances d'un individu sur une époque donnée par rapport à des hypothèses de restitution, ou encore améliorer les qualités immersives d'un environnement en évaluant les facteurs permettant de faire émerger cette présence d'être dans le temps. Cet objectif propose donc d'explorer la validité et la fiabilité de trois questions de présence historique associées au Questionnaire sur l'Etat de Présence, puis de comparer les capacités discriminatives lorsque cette présence historique est associée à la présence spatiale par rapport à la présence spatiale seule.

3.3.1.1.3. *Pratique des jeux vidéo*

Comme nous l'avons décrit en introduction dans la présentation des facteurs humains impactant l'expérience en réalité virtuelle, il existe de larges différences entre les différents types de jeux vidéo existants, que ce soit dans le cadre de la pratique ou dans les processus inhérents à ces derniers (*intensifs* ou *casual*). Cependant, ces différences ne sont pas toujours prises en compte. En effet, la variable pratique des jeux vidéo était considérée dans Neuroprésence comme une mesure à une seule dimension évaluant la fréquence de jeux. Or, il est fort possible qu'évaluer cette pratique en quantité uniquement atténue une partie de sa pertinence. C'est pourquoi cette variable est constituée dans Spatioprésence comme une mesure à deux dimensions évaluant la fréquence de jeux et le type de jeux pratiqués (jeux occasionnels ou intensifs). L'objectif ici est donc de comparer ces deux mesures, notamment en évaluant leurs capacités prédictives sur les autres facteurs humains de la réalité virtuelle.

3.3.1.1.4. Hypothèses

La première hypothèse de cette étude concerne l'évolution de la dépendance au champ. Considérant les relations énoncées entre les différents facteurs humains, l'hypothèse a priori est que les sujets diminuant leur dépendance au champ sont les sujets les plus sensibles aux cybermalaises, les plus féminins, les moins présents, les moins expérimentés avec les jeux vidéo et les plus dépendants à l'égard du champ. Concernant la présence historique, l'hypothèse est que cette présence est fortement corrélée à la présence spatiale, et que ces deux dimensions de la présence prises ensemble permettent une exploration plus fine des facteurs humains que la présence spatiale seule. Cet objectif d'exploration d'une nouvelle sous-dimension de la présence est également l'occasion d'explorer les autres sous-dimensions du Questionnaire sur l'Etat de Présence,

notamment afin de les mettre en lien avec l'évolution de la dépendance au champ. Enfin, concernant la pratique des jeux vidéo, l'hypothèse est que la prise en compte d'une mesure à deux dimensions (type et fréquence) est plus informative et permet une meilleure association avec les autres facteurs de la réalité virtuelle qu'une mesure à une dimension (fréquence uniquement).

3.3.2. Matériels & méthodes

3.3.2.1. Participants

100 jeunes adultes dont 51 femmes (19.9 ± 2.14 ans) et 49 hommes (20.4 ± 1.8 ans) ont été recrutés localement en licence de psychologie à l'université de Caen Normandie. Les critères d'exclusion étaient : i) avoir moins de 18 ans ou de plus de 35 ans, ii) présenter des troubles neurologiques ou psychiatriques actuels ou passés, iii) présenter des déficiences visuelles ne permettant pas la vision stéréoscopique ou une vision non corrigée, iv) présenter des déficiences motrices ne permettant pas l'utilisation de commandes manuelles. Le Comité d'éthique de la recherche en éducation et en psychologie a validé l'expérimentation. Tous les participants ont signé un formulaire de consentement éclairé avant la collecte des données, et la procédure d'Helsinki (World Medical Association, 2013) a été strictement appliquée. Bien qu'ils aient été informés qu'ils pouvaient arrêter l'expérience à tout moment, aucun d'entre eux n'a choisi de le faire. Deux participants ont été exclus des analyses pour données aberrantes.

3.3.2.2. Matériels

3.3.2.2.1. *Test de la Baguette et du Cadre*

La dépendance au champ des participants était évaluée par une version virtuelle du Test de la Baguette et du Cadre (*Rod and Frame Test*) de Witkin et al. (1962). La version virtuelle est une version commerciale intégrée par la société Virtualis dans son logiciel RVR (Annexe 3). Les mécanismes classiques du test traditionnel sont repris pour casque de réalité virtuelle : placés en position assise droite sans toucher le dossier de la chaise et équipés d'un casque HTC-Vive leur proposant un cadre incliné de latéralement de 18 degrés, les participants devaient aligner, via un joystick classique (X-Box), une baguette initialement inclinée de 27 degrés par rapport à la verticale terrestre (0 degré). 16 essais ont été réalisés à partir de combinaisons d'ordre équilibré de deux inclinaisons de la baguette droite et gauche (-27 / +27 degrés) et de deux inclinaisons du cadre, droit et gauche (-18 / +18 degrés). Pour chaque essai, l'erreur absolue (en degrés) par rapport à la verticale terrestre a été enregistrée. Le degré de dépendance visuelle a été quantifié

à l'aide de l'erreur absolue moyenne. Plus l'erreur absolue moyenne est élevée, plus la verticale subjective est influencée par le cadre incliné, et donc plus le sujet est dépendant du champ.

3.3.2.2.2. *Environnement virtuel*

Un environnement virtuel a été construit à l'aide du moteur Unity3D et du langage de programmation C# par les auteurs de l'étude pour le casque de réalité virtuelle HTC-Vive (1080 x 1200 pixels par œil, 90 Hz, 110 degrés de champ de vision), en utilisant l'API et le SDK d'OpenVR et de SteamVR (Figure 3). Le système de réalité virtuelle fonctionnait sur un ordinateur utilisant une carte graphique NVIDIA GTX-1080, 16 Go de RAM et un Intel Core 5, ce qui a permis d'assurer un taux de rafraîchissement constant de 70 images par seconde. Un extrait vidéo de la vue première personne de l'environnement est disponible sur le site web Maneuvrier (2020). Les contrôleurs manuels HTC-Vive étaient également utilisés : les participants pouvaient se déplacer dans l'environnement par téléportation (ils pouvaient appuyer sur un bouton pour pointer un point sur le sol dans un rayon de 4 mètres puis relâcher le bouton pour se déplacer vers le point) afin de prévenir l'apparition de cybermalaises (Clifton & Palmisano, 2019). Ils pouvaient également ouvrir les portes en les touchant avec la représentation virtuelle du contrôleur.

L'environnement de test était suffisamment grand pour procurer aux participants un sentiment de liberté mais était en réalité un parcours guidé comportant 10 intersections où les participants devaient choisir entre deux directions représentées par deux portes. Les « bonnes » portes, représentant l'itinéraire à suivre, pouvaient être ouvertes alors que les « mauvaises » ne le pouvaient pas. Ceci a été fait pour donner aux participants un sentiment de liberté (et de présence) sans possibilité de se perdre dans l'environnement. Chaque intersection comportait un repère visuel unique (par exemple une statue, une fontaine, un arbre, ...) destiné à améliorer l'orientation mais aussi à permettre une évaluation a posteriori. L'environnement comprenait différents atouts afin d'augmenter le sentiment de présence du participant et contribuer à la fluidité de la procédure. Tout d'abord, un son interactif a été inclus avec les portes : ouvrir une « bonne » porte émettait un son de porte, tout comme essayer d'ouvrir une « mauvaise » porte émettait le son d'une tentative d'ouverture de porte fermée à clé. Deuxièmement, deux sons ambiants (vent, oiseaux) étaient joués en boucle en arrière-plan. Enfin, certains oiseaux artificiels intelligents volaient dans le ciel (suffisamment loin pour ne pas être distrayants) de façon pseudo-aléatoire, émettant des sons d'oiseaux. Tous les sons, à l'exception des sons ambiants, étaient spatialisés en 3D. Après une première visite guidée dans l'environnement virtuel (« Suivez les panneaux sur le chemin. Il n'y a pas de limite de temps, mais essayez d'être le plus rapide possible »), les participants étaient

virtuellement replacés au début de l'environnement et devaient refaire l'itinéraire réalisé précédemment, mais sans les balises pour les guider (« Vous devez maintenant refaire la visite, mais sans les panneaux pour vous aider. Il n'y a pas de limite de temps, mais essayez d'être le plus rapide possible »).

3.3.2.2.3. Questionnaires

Le questionnaire sur l'Etat de Présence, version française validée du Presence Questionnaire de (Witmer & Singer, 1998) a été utilisé, tous les sujets étant de langue maternelle française (Annexe 1). Le questionnaire sur l'Etat de Présence a été choisi afin de rendre compte d'un sentiment de présence comparable avec le plus grand nombre d'études. Les items évaluant l'haptique de celui-ci n'ont pas été incorporés dans l'étude, l'environnement virtuel n'utilisant pas de gants de données ou autres moyens de retours haptiques. Le Questionnaire sur les Cybermalaises (Annexe 2) a également été utilisé (Bouchard et al., 2007), version française validée et restructurée du Simulator Sickness Questionnaire original de Kennedy et al. (1993).

3.3.2.2.4. Pratique des jeux vidéo

Il existe pour cette étude deux variables destinées à rendre compte du rapport du participant avec les jeux vidéo. La première est la fréquence de jeux vidéo constituée par une simple échelle de Likert sur 7 points : « A quelle fréquence jouez-vous aux jeux vidéo ? De 1 (*Jamais*) à 7 (*Tous les jours*) ». La deuxième variable est appelée pratique des jeux vidéo. Elle est constituée également de la fréquence des jeux vidéo, mais modulée selon le type de jeu vidéo pratiqués. Le type de jeux vidéo pratiqués était évalué par une question à réponses multiples : « Si vous jouez à des jeux vidéo, à quel genre de jeux jouez-vous habituellement (cochez de zéro à trois des genres de jeux auxquels vous jouez le plus) ? ». Les réponses possibles étaient : « Stratégie en temps réel et arène de combat en ligne multi-joueurs / Jeux de simulation / Puzzles & Arcade / Jeux de tirs première personne / Jeux de plateforme / Jeux de rôle et d'aventures ». Chaque type de jeux vidéo était suivi de quelques exemples destinés à guider les participants ne connaissant pas ces étiquettes. Par exemple, jeux de tirs première personne était suivi de « Counter Strike, Overwatch, Apex Legends, Call of Duty, Fornite... », alors que Puzzle & Arcade était suivi de « Candy Crush, Fruits Ninja, Space Invader, Pac-Man, Overcooked... ». Les participants qui déclaraient jouer à une des trois catégories de jeux intensifs (stratégie en temps réel et arène de combats en ligne multijoueur / jeux de tirs première personne / jeux de rôle et d'aventure) recevaient le ratio 2, alors que les participants qui déclaraient ne jouer à aucun de ces jeux ou à aucun jeu recevaient le ratio 1. La variable expérience des jeux vidéo a donc été constituée en multipliant le coefficient de type de jeux pratiqués avec la fréquence de jeux vidéo rapportée.

3.3.2.2.5. *Présence historique*

Afin d'évaluer la présence historique, trois questions ont été ajoutées au Questionnaire sur l'Etat de Présence. Ces questions prenaient la forme d'échelle de Likert : « Dans quelle mesure vous êtes-vous senti(e) transporté(e) dans un autre temps ? / Dans quelle mesure avez-vous été imprégné de l'ambiance historique de l'environnement virtuel ? / Dans quelle mesure avez-vous ressenti un réalisme historique au sein de l'environnement virtuel ? ». Les échelles analogiques correspondaient toutes à : « 1 : Pas du tout » et « 7 : Tout à fait ». La somme de ces trois questions a permis de constituer le score de présence historique.

3.3.2.3. Procédure

Lorsque les participants entraient dans la salle de passation, ils étaient invités à lire attentivement le formulaire de consentement puis à le signer si celui-ci leur convenait. Ils étaient libres de poser toutes les questions voulues à l'expérimentateur. Une fois le consentement signé, les participants étaient équipés du casque HTC-Vive et étaient invités à réaliser une première fois le Test de la Baguette et du Cadre (A). Une fois celui-ci terminé, ils débutaient un tutoriel le permettant de prendre en main les contrôles de l'environnement de test. Ce tutoriel d'une durée de 3 à 4 minutes leur permettait d'apprendre à se déplacer, à ouvrir les portes, ainsi que la possibilité de rencontrer des portes pouvant s'ouvrir et des portes ne pouvant pas s'ouvrir. A la fin du tutoriel, les participants étaient invités, s'ils le désiraient, à recommencer ce dernier. Aucun participant n'a choisi de recommencer le tutoriel. Une fois l'interface prise en main, les participants réalisaient le test de cognition spatiale. Ils devaient ensuite répondre aux questionnaires sur l'Etat de Présence, aux questions ajoutées sur la Présence Historique ainsi qu'au Questionnaire sur les Cybermalaises, puis aux questions sur la fréquence de pratique des jeux vidéo. Ils passaient ensuite à nouveau le Test de la Baguette et du Cadre (B). Le score d'évolution de la dépendance au champ était mesuré comme suit :

$$\frac{\text{Mesure (B)} - \text{Mesure (A)}}{\text{Mesure (A)}}$$

Les participants étaient ensuite invités à poser d'éventuelles questions sur la passation, remerciés, puis quittaient le laboratoire.

3.3.2.4. Analyses statistiques

Concernant les objectifs secondaires d'exploration de la présence historique et de la mesure de l'expérience des jeux vidéo, des statistiques descriptives ainsi que des analyses de fiabilité (ω de McDonalds) ont été réalisées sur les différentes questions de la présence historique et de la présence spatiale, ainsi que de la fréquence et de l'expérience des jeux vidéo. Puis, des analyses

corrélationnelles ont été réalisées afin d'évaluer les associations entre ces deux formes de présence, ses sous-échelles et les deux mesures relatives aux jeux vidéo sur les facteurs humains annexes. Concernant l'objectif principal d'exploration de l'évolution de la dépendance au champ, un test *t* de Student pour échantillons appariés a été réalisé sur l'ensemble de l'échantillon entre les mesures de dépendance au champ avant (A) et après la navigation virtuelle (B). Les participants ont ensuite été divisés en trois groupes différents selon leurs scores d'évolution : le groupe diminution de la dépendance au champ (présentant une diminution d'au moins 10%, appelé groupe évol-), le groupe augmentation de la dépendance au champ (présentant une augmentation d'au moins 10%, appelé évol+), ainsi que le groupe ne présentant pas d'évolution de la dépendance au champ (entre +10% et -10%, appelé évol0). Ces groupes font l'objet d'analyses inter et intragroupes, à l'aide d'ANOVA pour chacun des facteurs humains de l'immersion (présence, cybermalaises, dépendance au champ, genre, expérience des jeux vidéo). Des analyses conjointes sur la présence spatiale telle que mesurée par le Questionnaire sur l'Etat de Présence ainsi que sur la présence globale (présence spatiale et présence historique) ont été réalisées. Le seuil de significativité a été fixé à .05 et une tendance à la significativité a été interprétée pour une valeur *p* comprise entre .05 et .1. Les tailles d'effet ont été rapportés par le coefficient *r* de Pearson pour les corrélations, le η^2 (Eta carré) pour les ANOVA le R^2 et f^2 pour les régressions linéaires.

3.4. Eduprésence : étude sur l'apprentissage

Eduprésence est la dernière expérimentation empirique du travail doctoral. Elle se détache des autres études en analysant une forme différente de la réalité virtuelle : il ne s'agit plus de casque de réalité virtuelle individuel à travers lequel le participant est immergé indépendamment, mais d'une visite pédagogique virtuelle sur grand écran stéréoscopique, réalisée par un guide professionnel et commune à tous les participants dans un amphithéâtre. Les analyses réalisées précédemment sur les différentes variables soulevées sont donc répétées dans ce contexte. Cette utilisation de l'outil peut être défendue comme une application à la frontière des définitions de la réalité virtuelle : si le guide réalise lui une expérience en réalité virtuelle qu'il commente, les participants sont spectateurs de cette immersion. Ils voient et sont immergés dans l'environnement virtuel, mais n'ont pas de capacités d'interaction ou de contrôle. Cependant, cette utilisation est vouée, par ses côtés pragmatiques, à se développer dans les domaines pédagogiques. Aussi, il convient d'étudier l'effet des facteurs humains dans ce cadre, ainsi qu'une question posée par l'utilisation même de l'écran stéréoscopique, la position physique du participant par rapport à l'écran stéréoscopique. Au moment où ces lignes sont écrites, le manuscrit de l'étude Eduprésence est soumis dans une revue scientifique à comité de lecture. Les coauteurs sont, par ordre de publication, Arthur Maneuvrier, Karim Sammour, Blandine Verjut, Patrice Renaud, Leslie Marion Decker, Philippe Fleury.

3.4.1. Problématisation

3.4.1.1. Objectifs

L'objectif de l'étude Eduprésence est double. Tout d'abord cette expérimentation propose d'étudier l'effet de la présence sur le transfert de connaissances dans un environnement virtuel d'apprentissage, et plus particulièrement d'apprentissage de contenu historique et patrimonial. Pour ce faire, il est indispensable, encore une fois, d'étudier les effets que les facteurs humains – cybermalaises, pratique des jeux vidéo, dépendance au champ, genre – peuvent avoir sur le sentiment de présence, la performance et leur relation. Cette objectif est en cela similaire à celui des études Neuroprésence sur les fonctions exécutives et Spatioprésence sur la cognition spatiale, à la différence que la mesure de performance est ici une mesure d'apprentissage de contenu présenté par une visite en réalité virtuelle, similaire à une présentation pédagogique suivie d'une évaluation de même nature. Puisqu'il s'agit de contenu relativement précis (la Rome Antique) l'intérêt du participant pour cette période historique a été évalué et intégré dans les analyses. Cet intérêt pour le contenu pourrait en effet s'avérer décisif pour une meilleure compréhension des

facteurs en jeu, notamment au regard des liens entretenus entre sentiment de présence, apprentissage et attention. Compte tenu du grand écran stéréoscopique multi-utilisateurs utilisé dans cette étude comme dans de nombreuses applications pédagogiques de la réalité virtuelle, il est également nécessaire d'évaluer l'impact que la distance par rapport au point stéréoscopique de référence pourrait avoir, en particulier sur les cybermalaises. Aucune étude n'a, à notre connaissance, évalué la relation existante en réalité virtuelle entre sentiment de présence et apprentissage (transfert de connaissances) en même temps que les facteurs humains modérateurs, et jamais la question du point stéréoscopique de référence ou de la présence historique n'a été abordée. L'objectif secondaire de cette étude est de poursuivre les explorations sur la mesure du rapport de l'individu avec les jeux vidéo en répétant les analyses de l'étude précédente mais en incorporant le visionnage de film en trois dimensions, la pratique de la réalité virtuelle ainsi que le support de jeux (ordinateurs et consoles de salon ou téléphones et consoles portables) dans des analyses destinées à évaluer une expérience vidéoludique plus large.

3.4.1.1.1. Point de référence stéréoscopique

Quelles que soient les modalités matérielles ou immersives, l'affichage stéréoscopique est une brique fondamentale de la réalité virtuelle, car il permet la perception d'objets flottant devant l'écran, et est également l'un des principaux indices de la perception de la profondeur chez l'homme (Howard & Rogers, 2002). De nombreuses techniques sont utilisées pour rendre cette sensation de profondeur. Outre les casques de réalité virtuelle qui utilisent souvent des entrées vidéo doubles ou le multiplexage côte à côte, l'une des plus utilisées depuis la première CAVE est le système 3D à obturateur actif, également connu sous le nom de séquençage d'images alternées. Il fonctionne en présentant l'image destinée à un œil tout en bloquant la vue de l'autre œil, puis en alternant à une fréquence de rafraîchissement synchronisée avec l'affichage. La plupart des lunettes actives utilisent un obturateur à cristaux liquides (Turner & Hellbaum, 1986) tandis que les systèmes passifs utilisent des lunettes polarisées pour limiter la lumière qui atteint chaque œil. L'un des problèmes de l'affichage stéréoscopique est le point de référence stéréoscopique : considérant que l'effet de profondeur est obtenu en mélangeant deux entrées vidéo légèrement différentes, un point est considéré comme le point de référence central avec la superposition optimisée des deux entrées. Dans un système CAVE ou d'autres systèmes de réalité virtuelle, ce point central est suivi pour une personne (souvent avec des capteurs sur les lunettes), ce qui permet d'obtenir le meilleur rendu possible à tout moment. Mais lorsque plusieurs personnes sont immergées, par exemple avec un grand écran stéréoscopique comme c'est le cas dans cette étude, cette superposition parfaite ne peut pas être obtenue pour tout le monde. Si la

séance se déroule dans un amphithéâtre, la conjonction sera généralement placée au milieu de la salle. Ainsi, plus un individu est éloigné du milieu de la salle, moins la double correspondance vidéo sera synchronisée. Cet effet est d'autant plus important qu'il existe un effet connu de la distance par rapport à l'écran sur la perception, notamment sur l'évaluation des distances et les tailles relatives des objets (Vienne et al., 2020). Même si cette discordance visuelle entre la position du sujet et la position du point de référence stéréoscopique est souvent légère, on ignore si cela peut affecter le sentiment de présence et la relation de transfert de connaissances ou tout autre facteur humain impliqué. En effet, on suggère souvent que le décalage perceptuel est à l'origine du mal des transports et des cybermalaises, ce qui pourrait avoir un effet négatif sur les données expérimentales ou les utilisations éducatives de la réalité virtuelle sur grand écran stéréoscopique : si certains participants peuvent ressentir moins de présence et plus de cybermalaises simplement à cause de leur place dans l'amphithéâtre, cela doit être étudié méthodologiquement.

3.4.1.2. Hypothèses

L'hypothèse principale de cette étude est que le sentiment de présence favorise l'apprentissage, et que cette relation est modérée par les autres facteurs humains nommés précédemment (cybermalaises, dépendance au champ, intérêt pour le contenu présenté, distance par rapport au point de référence stéréoscopique). Pour ce faire, il est nécessaire de rendre compte des relations entre ces différentes variables, dont les hypothèses d'association et de direction peuvent être retrouvées dans le Tableau 3.

	Transfert de connaissances	Sentiment de présence	Cybermalaises	Expérience des jeux vidéo	Dépendance au champ	Intérêt pour le contenu
Transfert de connaissances						
Sentiment de présence	+					
Cybermalaises	-	-				
Expérience des jeux vidéo	+	+	-			
Dépendance au champ	-	-	+	-		
Intérêt pour le contenu	+	+	-	∅	∅	
Distance point de référence	-	-	+	∅	∅	∅

Tableau 3. – Représentation graphique des hypothèses d'association et de direction dans l'étude Eduprésence. Un « + » signifie une hypothèse de corrélation positive, un « - » signifie une hypothèse de corrélation négative et un « Ø » signifie une absence d'hypothèse.

Concernant les hypothèses secondaires, nous émettons des hypothèses similaires à celles de l'étude Nav(i)r : la présence spatiale et historique sera davantage associée aux facteurs humains de la réalité virtuelle que la présence spatiale seule, et une mesure de l'expérience des jeux vidéo pluridimensionnelle sera davantage associée aux facteurs humains de la réalité virtuelle unidimensionnelle (fréquence uniquement).

3.4.2. Matériels & méthodes

3.4.2.1. Participants

69 jeunes adultes ont été recrutés localement sur le campus universitaire caennais par des annonces publiques ou par courrier électronique. 43 femmes (20 ± 2 ans) et 26 hommes (21.1 ± 2.26 ans) ont été sélectionnés. Les critères d'exclusion comprenaient : i) avoir moins de 18 ans ou plus de 30 ans, ii) la présence actuelle ou passée de troubles neurologiques ou psychiatriques, iii) des déficiences visuelles ne permettant pas une vision stéréoscopique ou des problèmes de vision non corrigés, iv) une expertise excessive concernant la Rome antique biaisant l'évaluation du contenu (un master en histoire antique ou tout autre domaine connexe). La présente expérience a été validée par le Comité Local d'Ethique de la Recherche en Santé de l'Université de Caen Normandie. Tous les participants ont signé un formulaire de consentement éclairé avant la collecte des données. La déclaration de Helsinki a été strictement respectée (World Medical Association, 2013). Les participants ont été invités à remplir et à signer le formulaire de consentement éclairé afin de reconnaître leur volonté de se porter volontaires en tant que participants. Ils ont été informés qu'ils pouvaient arrêter l'expérience à tout moment, et un participant a décidé de le faire pour des raisons personnelles. De plus, un participant a été exclu des analyses pour données aberrantes.

3.4.2.2. Matériels

3.4.2.2.1. Visite pédagogique virtuelle

Un amphithéâtre (150 places) équipé d'un écran stéréoscopique a été utilisé pour cette expérience. La taille de l'écran était de 5.5 x 3.43 mètres. Le procédé stéréoscopique utilisait une projection à double entrée (1920 x 1200 pixels pour chaque œil) avec une trame alternée et des lunettes polarisées. La SRP centrale a été placée perpendiculairement à l'écran, à 7 mètres de

distance, au milieu de l'amphithéâtre. L'ordinateur utilisait une NVIDIA GeForce GTX-1080. Le moteur Unity3D a été utilisé pour le rendu et le langage C# pour la programmation. Une fréquence d'images constante bloquée à 70 images par seconde était assurée. Tout le contenu virtuel, l'ensemble du Forum de Trajan (Figure 14), a été réalisé au sein d'une équipe d'historiens universitaires du projet Plan de Rome en accord avec les hypothèses de restitution scientifique les plus récentes (Fleury & Madeleine, 2007, 2011, 2012). Sur la base de ce contenu d'origine historique, un guide professionnel a effectué une visite pédagogique d'une demi-heure dans cet environnement virtuel. Ce guide, Karim Sammour (Fleury et al., 2016), a conduit à la fois la navigation virtuelle dans le Forum de Trajan et la présentation historique qui lui était associée. La grande majorité du contenu présenté oralement était associée au contenu visuel de l'environnement virtuel.



Figure 14. – Vue première personne de l'environnement virtuel de l'étude Eduprésence.

3.4.2.2.2. *Test des Figures Enchevêtrées de Groupe*

La version traditionnelle du Test des Figures Enchevêtrées (ou entremêlées) pour Groupes a été utilisée pour cette expérimentation (Witkin et al., 1971). La passation se réalisant simultanément pour tous les participants, il était impossible de réaliser le Test de la Baguette ou du Cadre. Ce test mesure lui aussi les capacités analytiques et la dépendance au champ des participants. Il consiste en une série de différentes figures (6 items d'apprentissage, 18 items cibles), appelées

« figures complexes », au sein desquelles le participant doit retrouver des "figures cibles, appelées « figures simples ». Le participant est chronométré et dispose de 20 minutes pour trouver un maximum de figures simples au sein de ces figures complexes. Plus un participant trouve de figures simples (sur les 18), moins celui-ci est dépendant à l'égard du champ.

3.4.2.2.3. Questionnaires

Le questionnaire sur l'Etat de Présence, version française validée du Presence Questionnaire de (Witmer & Singer, 1998) a été utilisé (Annexe 1), tous les sujets étant de langue maternelle française. Le questionnaire sur l'Etat de Présence a été choisi afin de rendre compte d'un sentiment de présence comparable avec le plus grand nombre d'études. Les items évaluant l'haptique de celui-ci n'ont pas été incorporés dans l'étude, l'environnement virtuel n'utilisant pas de gants de données ou autres moyens de retours haptiques. De plus, tous les items d'interaction avec l'environnement étaient supprimés, le sujet n'ayant pas d'interaction directe avec l'environnement virtuel présenté. Ces questions ont été remplacées par des questions sur la présence historique validées dans l'étude précédente : « Dans quelle mesure vous êtes-vous senti transporté dans un autre temps ? / Dans quelle mesure avez-vous été imprégné de l'ambiance historique de l'environnement virtuel ? / Dans quelle mesure avez-vous ressenti un réalisme historique au sein de l'environnement virtuel ? ». Le Questionnaire sur les Cybermalaises (Annexe 2) a également été utilisé (Bouchard et al., 2007), version française validée et restructurée du Simulator Sickness Questionnaire original de Kennedy et al. (1993).

3.4.2.2.4. Expérience des jeux vidéo

Il existe pour cette étude deux variables destinées à rendre compte du rapport du participant avec les jeux vidéo. La première est la fréquence de pratique des jeux vidéo constituée par une simple échelle de Likert sur 7 points : « A quelle fréquence jouez-vous aux jeux vidéo ? De 1 (*Jamais*) à 7 (*Tous les jours*) ». La deuxième variable est appelée expérience des jeux vidéo. Celle-ci n'est pas constituée par la variable fréquence de jeux vidéo comme évaluée par l'échelle de Likert, mais de plusieurs sous-dimensions. La première correspond à la réponse libre à la question : « En moyenne, combien d'heures par semaine jouez-vous aux jeux vidéo ? ». La deuxième correspond au genre de jeux vidéo pratiqués : « Si vous jouez à des jeux vidéo, à quel genre de jeux jouez-vous habituellement (cochez de zéro à trois des genres de jeux auxquels vous jouez le plus) ? ». Les réponses possibles étaient : « Stratégie en temps réel et arène de combat en ligne multi-joueurs / Jeux de simulation / Puzzles & Arcade / Jeux de tirs première personne / Jeux de plateforme / Jeux de rôle et d'aventures ». Chaque type de jeux vidéo était suivi de quelques exemples destinés à guider les participants ne connaissant pas ces étiquettes. Par exemple, jeux de tirs

première personne était suivi de « Counter Strike, Overwatch, Apex Legends, Call of Duty, Fortnite, ... », alors que Puzzle & Arcade était suivi de « Candy Crush, Fruits Ninja, Space Invader, Pac-Man, Overcooked, ... ». Les participants qui déclaraient jouer à une des trois catégories de jeux intensifs (stratégie en temps réel et arène de combats en ligne multijoueur / jeux de tirs première personne / jeux de rôle et d'aventure) recevaient le score 1, alors que les participants qui déclaraient ne jouer à aucun de ces jeux ou à aucun jeu recevaient le score 0. De la même façon, les participants étaient interrogés sur le support de jeux : « Si vous jouez à des jeux vidéo, quel support utilisez-vous habituellement (cochez de zéro à deux supports utilisés) : ». Les supports possibles étaient : « Ordinateurs et consoles de salon / Téléphones et consoles portables », bien qu'il fût possible de ne cocher aucune réponse. Les participants reportant jouer sur ordinateurs ou consoles de salon recevaient le score 1, alors que les participants qui déclaraient utiliser un support mobile ou aucun support recevaient le score 0. Les autres évaluations constituant la mesure de l'expérience des jeux vidéo portaient sur l'utilisation de la réalité virtuelle : « A quelle fréquence pratiquez-vous la réalité virtuelle ? De 1 (*Jamais*) à 7 (*Tous les jours*) », ainsi que sur le visionnage de films en trois dimensions : « A quelle fréquence visionnez-vous des films en trois dimensions ? De 1 (*Jamais*) à 7 (*Tous les jours*) ». La variable pratique des jeux vidéo, appelée expérience des jeux vidéo, a été constituée en additionnant les réponses aux différentes échelles ainsi que les différents scores.

3.4.2.3. Procédure

Après avoir signé le formulaire de consentement éclairé, les participants étaient invités à leur place dont ils devaient communiquer le numéro. La distance par rapport au point de référence stéréoscopique a été calculée en fonction du produit de deux variables : la distance entre le siège du participant et l'écran, et l'angle entre le siège du participant et le milieu de l'écran. Avant le début de l'expérimentation, les participants devaient signaler leur intérêt pour la période historique en répondant à la question suivante : « A quel point avez-vous un intérêt pour la période historique de la Rome antique ? Où 1 (*Pas du tout*) et 7 (*Immensément*) », ainsi que répondre aux questions sur l'expérience des jeux vidéo. Ensuite, le guide historique prenait place, l'environnement pédagogique était lancé et la visite virtuelle éducative dans le Forum de Trajan débutait. Juste après les trente minutes d'exposition de l'environnement pédagogique, les participants devaient répondre à la version modifiée (avec les questions sur la présence historique) du Questionnaire sur l'Etat de Présence (Annexe 1). Les participants devaient également répondre au Questionnaire sur les Cybermalaises (Annexe 2). Ensuite, les participants avaient 20 minutes pour passer le Test des Figures Enchevêtrées pour Groupes afin i) d'évaluer leur dépendance au champ et ii)

d'agir comme une distraction entre la phase d'encodage et de rappel de l'apprentissage. Enfin, les participants disposaient de 10 minutes pour répondre au plus grand nombre possible de questions à choix unique sur 20 questions liées au contenu historique, archéologique et patrimonial de la visite virtuelle, dont la somme (de 0 à 20) constituait la variable de mesure du transfert de connaissances. La durée totale de la session était de 70 minutes après lesquelles les participants ont été remerciés et ont quitté l'amphithéâtre.

3.4.2.4. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide de la version 0.2.12.1 de JASP. Le coefficient de corrélation de Pearson r ainsi que l'oméga ω de McDonald ont été utilisés pour tester les associations entre les éléments restants du questionnaire de présence et les éléments ajoutés concernant l'immersion historique. Ces mêmes analyses ont été réalisées pour explorer les différentes façons de mesurer le rapport de l'individu avec les jeux vidéo. Les corrélations de Pearson ont également été utilisées pour étudier les associations entre les différentes variables des facteurs humains (c'est-à-dire le transfert de connaissances, la présence, les cybermalaises, la dépendance au champ, l'expérience des jeux vidéo, la distance par rapport au point de référence stéréoscopique et l'intérêt pour le contenu présenté). Comme nos prédictions a priori étaient directionnelles, des tests unilatéraux ont été utilisés pour les corrélations. Une analyse en composantes principales a été utilisée pour approfondir la compréhension des processus impliqués. Les composantes principales à valeurs propres supérieures à 1 ont été extraites afin d'observer l'articulation entre les différents facteurs et composantes à l'aide de rotations obliques Promax sur les matrices de corrélations. Des régressions linéaires (méthode entrée) ont ensuite été utilisées pour tester individuellement le poids potentiel de chaque variable comme prédicteur de la présence, de la performance et de leur relation (analyse de médiation). La régression linéaire a également été utilisée pour tester si la distance par rapport au point de référence stéréoscopique pouvait aider à prédire les cybermalaises. Le test de Levene a été utilisé pour vérifier que les variances étaient égales pour tous les échantillons, et des diagnostics de colinéarité ont été faits. Le seuil de significativité a été fixé à .05 et une tendance à la significativité a été interprétée pour une valeur p comprise entre .05 et .1. Les tailles d'effet ont été rapportées par le coefficient r de Pearson pour les corrélations, le η^2 (Eta carré) pour les ANOVA le R^2 et f^2 pour les régressions linéaires. Une valeur aberrante a été exclue car un participant présentant des scores anormalement bas a rapporté s'être endormi.

3.5. Analyses transversales

Ces analyses correspondent à des analyses a posteriori réalisées dans le but de comparer les différentes études. Selon les possibilités statistiques et méthodologiques, les scores aux différents facteurs humains (sentiment de présence, performance, dépendance au champ, pratique des jeux vidéo, cybermalaises) ont fait l'objet de comparaisons inter et intragroupes.

3.5.1. Problématisation

3.5.1.1. Objectifs

Le premier objectif de ces analyses transversales est de comparer les scores aux différentes mesures de facteurs humains entre les trois expérimentations (Neuroprésence, Spatioprésence, Eduprésence), mais aussi par rapport à leurs normes de références (Questionnaire sur l'Etat de Présence et Questionnaires sur les Cybermalaises). Ces comparaisons, associés aux comparaisons du matériel utilisé et de la tâche réalisée, devraient permettre de mettre en relation les dynamiques entre les facteurs humains et les caractéristiques systèmes. Il s'agit également de comparer les associations entre les variables étudiées au sein de chaque expérimentation. Le deuxième objectif de ces analyses transversales est d'agrèger les données expérimentales, si possible, afin de réaliser des statistiques sur un échantillon plus large et donc peut-être rendre des analyses plus précises en évinçant les bruits issus de chaque expérimentation.

3.5.1.2. Hypothèses

Concernant les comparaisons intergroupes, l'hypothèse a priori est que l'étude Spatioprésence, présentant une tâche intégrée à l'environnement virtuel, engendrera davantage de présence que Neuroprésence, qui engendrera davantage de présence que Eduprésence car réalisée avec du matériel peu englobant et ne présentant pas d'interaction. Pour les mêmes raisons, l'hypothèse est que Spatioprésence engendrera moins de cybermalaises que Neuroprésence qui incorporait un flux visuel, qui engendrera davantage de cybermalaises que Eduprésence, présenté sur écran stéréoscopique et non dans un casque. Concernant les analyses sur données agrégées, les hypothèses a priori sont les mêmes que celles issues de chacune des expérimentations : une association positive entre présence, performance et pratique des jeux vidéo, et une association négative présence, cybermalaises et dépendance à l'égard du champ.

3.5.2. Matériels & méthodes

3.5.2.1. Analyses statistiques

Les données supportant ces analyses sont issues exclusivement des études expérimentales Neuroprésence (groupe réalité virtuelle), Spatioprésence et Eduprésence présentées en amont de cette partie, pour un total de 169 observations, dont deux exclusions de données aberrantes. L'étude Nav(i)r n'a pas été incluse à cause de : 1) le biais expérimental inhérent présenté ne permettant pas d'analyses sur la performance et 2) la potentielle superposition de la variance issue de cette expérimentation avec celle de Spatioprésence. Les données ont été traitées à l'aide du logiciel JASP version 0.2.12.1. Ces données ont été divisées en trois groupes expérimentaux selon l'expérimentation dont elles sont issues. Les analyses ont ensuite été réalisées à l'aide de statistiques descriptives, notamment l'oméga (ω) de McDonalds, ainsi que d'ANOVAs, de tests t de Student et de tests post-hoc, mais les modalités de ces analyses changent selon les possibilités de comparaisons provoquées par des différences dans le matériel utilisé. Le seuil de significativité a été fixé à .05 et une tendance à la significativité a été interprétée pour une valeur p comprise entre .05 et .1. Les tailles d'effet ont été rapportées par le coefficient r de Pearson pour les corrélations, le η^2 (Eta carré) pour les ANOVA, le R^2 et f^2 pour les régressions linéaires et le d de Cohen pour les tests t de Student.

3.5.2.1.1. Analyses intragroupes

Le sentiment de présence et le niveau de cybermalaises de chaque expérimentation fera l'objet de comparaison entre les niveaux rapportés et les niveaux standardisés par le Questionnaire sur l'Etat de Présence et le Questionnaire sur les Cybermalaises à l'aide du test t de Student pour échantillon seul. Puisque l'étude Eduprésence utilise un questionnaire de présence légèrement différent, cette comparaison n'a pas lieu d'être. Cependant, le sous-item Réalisme étant resté intact, les comparaisons portent uniquement sur cette sous-échelle.

3.5.2.2.2. Analyses agrégées

Concernant les analyses agrégées, le choix a été fait de normaliser toutes les valeurs expérimentales, et ceci à l'aide du z-score. Le z-score consiste à soustraire la moyenne à une valeur x puis de la diviser par l'écart type. Ces valeurs normalisées sont ensuite agrégées pour faire l'objet de statistiques descriptives, puis pour tester les hypothèses transversales. Une matrice corrélative a été réalisée à l'aide du coefficient r de Pearson pour chacune des variables examinées (performance, présence, cybermalaises, expérience des jeux vidéo, dépendance à l'égard du

champ, genre). Puis, une analyse par composantes principales a été réalisée sur la matrice corrélationnelle à l'aide de la rotation Promax. Les composantes ont été extraites à partir de valeurs propres supérieures à 1. Enfin, des régressions linéaires ont été réalisées (méthode entrée) afin de tester les capacités explicatives et prédictives de chaque variable (performance, présence, cybermalaises, expérience des jeux vidéo, dépendance à l'égard du champ, genre) sur chaque variable expérimentalement provoquée (performance, sentiment de présence, cybermalaises). Dans le but de contrôler des effets parasites potentiels, des régressions linaires ont été réalisées sur les variables expérimentales (performance, présence et cybermalaises) avec le temps d'immersion et l'âge des participants comme variables dépendantes. Afin d'éviter une redondance dans l'étude de la variance, chacune des variables expérimentalement provoquée a été, une fois étudiée comme variable dépendante, exclue des variables indépendantes.

4. Résultats

4.1. Neuroprésence : étude sur les fonctions exécutives

4.1.1. Modalités du Wisconsin Card Sorting Test selon le genre

L'ANOVA révèle une interaction significative entre la modalité (réalité virtuelle et papier-crayon) et le genre (hommes et femmes) sur la performance au Wisconsin Card Sorting Test ($F(1,105) = 6.85, p = .01, \eta^2 = 0.061$). Comme illustré par la Figure 15, le test post-hoc de Tuckey révèle également une tendance dans le sens où les hommes montrent une meilleure performance dans la modalité réalité virtuelle que dans la modalité papier-crayon ($t = 2.5, p = .066$).

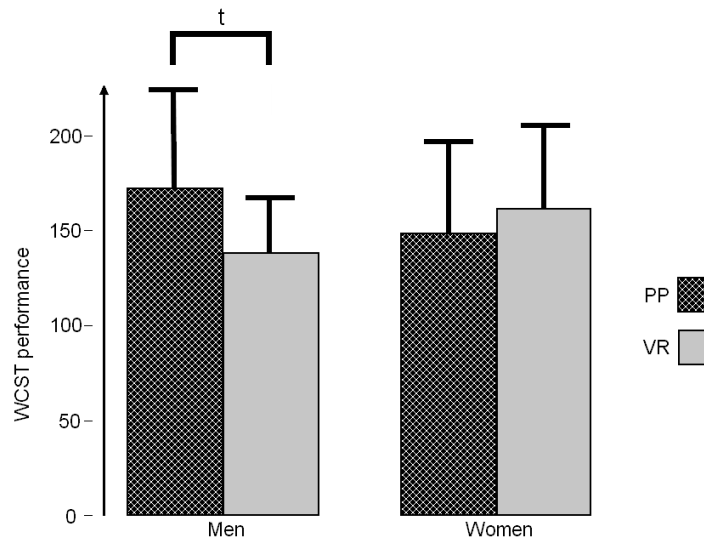


Figure 15. – Représentation graphique des résultats de l'ANOVA sur la performance au Wisconsin Card Sorting Test de l'étude Neuroprésence entre les hommes et les femmes dans les modalités papier-crayon (PP) et réalité virtuelle (VR). Un « t » signifie un effet tendanciel.

4.1.2. Influence des facteurs humains sur la performance virtuelle

4.1.2.1. Corrélations entre genre et autres facteurs humains

Une corrélation positive a été trouvée entre genre masculin et performance au Wisconsin Card Sorting Test virtuel ($r = .268, p = .025$). De la même façon, il existe une corrélation positive avec la pratique des jeux vidéo ($r = .52, p = .001$), et une corrélation négative avec la dépendance à l'égard du champ ($r = -.45, p = .001$).

4.1.2.2. Corrélations entre les différents facteurs humains

Les corrélations de Pearson révèlent une association négative entre dépendance au champ et sentiment de présence ($r = -.311, p = .011$), entre dépendance au champ et pratique des jeux vidéo ($r = -.5, p = .001$), ainsi qu'une association positive entre dépendance au champ et cybermalaises ($r = .35, p = .005$). De plus, une corrélation tendancielle négative entre sentiment de présence et cybermalaises a été trouvée ($r = -.2, p = .072$).

4.1.2.3. Analyse en composantes principales dans la modalité réalité virtuelle

Deux composantes avec des valeurs propres supérieures à 1 ($RC1 : 1.87$ et $RC2 : 1.07$) ont été extraites par l'analyse par composants principaux (Figure 16). $RC1$ et $RC2$ expliquent ensemble 58% de la variance totale. $RC1$ (37% de la variance) est composée négativement du sentiment de présence (contribution = .54) et de la pratique des jeux vidéo (contribution = -.76), et positivement de la dépendance au champ (contribution = .89) et des cybermalaises (contribution = .45). $RC2$ (21% de la variance) est composée exclusivement et négativement de la performance au Wisconsin Card Sorting Test virtuel (contribution = .9). Les deux composantes sont négativement corrélées ($r = -.27$). Enfin, un t-test de Student pour échantillons indépendants sur les scores de chaque individu pour chacun des composants montre un effet du genre ($t = 4.49, p = .001, d$ de Cohen = 1.224) au sein de $RC2$ dans le sens où les femmes ont des scores globalement plus élevés que les hommes (Figure 17).

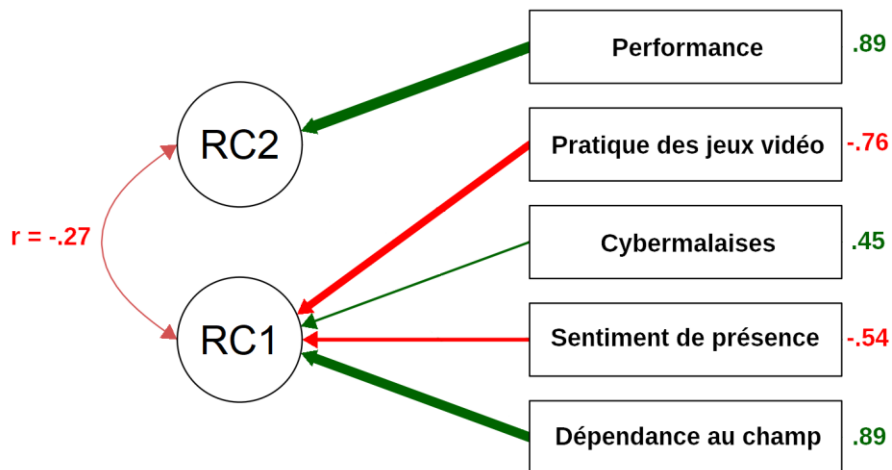


Figure 16. – Analyse en composantes principales. Représentation graphique de la contribution de chacune des variables aux deux composantes principales au sein de Neuroprésence (vert : contribution positive, rouge : contribution négative) ainsi que de la corrélation entre les deux composantes.

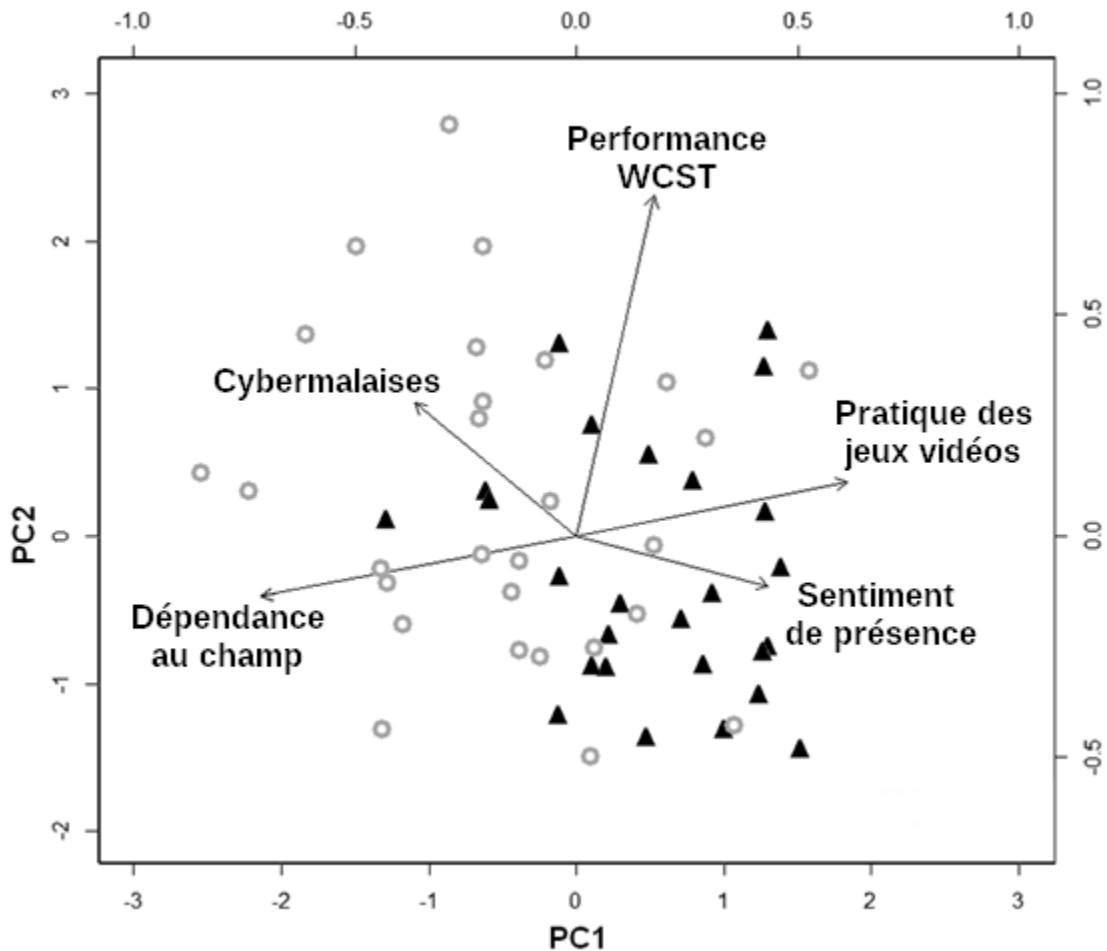


Figure 17. – Représentation graphique de l'analyse en composantes principales de la modalité réalité virtuelle du Wisconsin Card Sorting Test de l'étude Neuroprésence. Illustration des deux composantes (valeurs propres ≥ 1 , $RC1$: 37% de variance, $RC2$: 21% de variance) extraites sur respectivement quatre facteurs humains (i.e. dépendance au champ, cybermalaises, sentiment de présence, pratique des jeux vidéo) et la performance au test. Les triangles noirs représentent les hommes et les ronds gris les femmes.

4.1.2.4. Régressions linéaires

4.1.2.4.1. Performance au Wisconsin Card Sorting Test

Le genre masculin est un prédicteur significatif positif de la performance au Wisconsin Card Sorting Test : $\beta = -0.28$, $t(53) = -2$, $p = .05$. Le genre masculin explique une proportion significative de la variance de la performance au Wisconsin Card Sorting Test : $R^2 = .072$, $F(1, 52) = 4.04$, $p = .05$, $f^2 = .075$.

4.1.2.4.2. *Sentiment de présence*

La pratique des jeux vidéo est un prédicteur significatif positif du sentiment de présence : $\beta = .0716$, $t(53) = 2.15$, $p = .036$, aux côtés d'une interaction entre dépendance au champ et pratique des jeux vidéo : $\beta = -0.635$, $t(53) = -2.19$, $p = .033$, sans effet simple de la dépendance au champ. Ce modèle explique une proportion significative de la variance dans le sentiment de présence $R^2 = .179$, $F(3, 50) = 3.62$, $p = .019$, $f^2 = .218$.

4.1.2.4.3. *Cybermalaises*

La dépendance au champ est un prédicteur significatif positif des cybermalaises : $\beta = .35$, $t(53) = 2.69$, $p = .01$. La dépendance au champ explique une proportion significative de la variance des cybermalaises, $R^2 = .12$, $F(1, 52) = 7.243$, $p = .01$, $f^2 = .136$.

4.1.3. **Effet du stress ressenti**

4.1.3.1. Comparaison entre les deux modalités

Le test t de Student pour échantillons indépendants révèle une différence significative de stress rapporté entre les deux groupes dans le sens où les individus réalisant le test en modalité réalité virtuelle se disent moins stressés par le fait d'être évalués ($t(107) = 1.91$, $p = .029$, d de Cohen = 0.37).

4.1.3.2. Association du stress avec d'autres facteurs dans la modalité virtuelle

Le stress rapporté n'est pas associé significativement avec le sentiment de présence ou la performance. Cependant, il existe une association positive entre stress rapporté et dépendance au champ ($r = .35$, $p = .01$) ainsi qu'une association positive entre stress rapporté et symptômes de cybermalaises ($r = .3$, $p = .023$).

4.2. Spatioprésence : étude sur la cognition spatiale

4.2.1. Analyses préliminaires

4.2.1.1. Performance de cognition spatiale

Avec une moyenne globale de 2.43 ± 0.49 et un McDonald's ω de $.761$, nous considérons que les différents sous-items de l'évaluation de la cognition spatiale montrent une relativement bonne fiabilité. En conséquence, nous utilisons la mesure globale (la somme de tous les éléments) de manière indépendante et unitaire.

4.2.1.2. Pratique des jeux vidéo

La fréquence moyenne de pratique des jeux vidéo sur une échelle de Likert allant de 1 (*Jamais*) à 7 (*Tous les jours*) est de 3.83 ± 2.05 . Les hommes ont déclaré en moyenne un score de 4.3 ± 1.91 et les femmes de 3.37 ± 2.12 . En ce qui concerne le type de jeux pratiqués, 29 participants ont déclaré jouer au moins à un jeu intensif (19 hommes, 10 femmes), tandis que 18 ont déclaré ne jouer que à des jeux occasionnels ou *casual* (4 hommes, 14 femmes). Aucune corrélation significative entre les sexes et la fréquence des jeux vidéo n'a été constatée, mais le fait de jouer à des jeux intensifs est significativement corrélé au genre masculin ($r = .421, p = .003$) et à la fréquence de pratique des jeux vidéo ($r = .558, p = .001$). Les type de jeux vidéo (intensifs, occasionnels) et la fréquence des jeux vidéo pris ensemble montrent une forte fiabilité (McDonald's ω de $.716$) et ont été utilisés pour construire la variable de pratique des jeux vidéo. Cette variable montre une forte fiabilité avec ses deux composantes (McDonald's ω de $.897$) et a donc été utilisée de manière indépendante et unitaire.

4.2.2. Matrice de corrélations

La performance de cognition spatiale est positivement corrélée au sentiment de présence ($r = .369, p = .005$), négativement corrélée aux cybermalaises ($r = -.29, p = .029$), et positivement associée, de façon tendancielle, à la pratique des jeux vidéo ($r = .21, p = .075$). Le sentiment de présence est négativement associé aux cybermalaises ($r = -.27, p = .031$), et positivement associé à la pratique des jeux vidéo ($r = .32, p = .013$). Les cybermalaises sont négativement associés à la pratique des jeux vidéo ($r = -.32, p = .013$) et positivement au genre masculin ($r = .3, p = .02$), dans le sens où les hommes sont moins sensibles aux cybermalaises. Enfin, le genre masculin est positivement associé mais seulement de façon tendancielle avec la pratique des jeux vidéo ($r = .23, p = .053$) et la dépendance à l'égard du champ ($r = .24, p = .055$). La dépendance à l'égard

du champ n'est significativement corrélée à aucune autre variable. La Figure 18 représente les principales corrélations selon le genre.

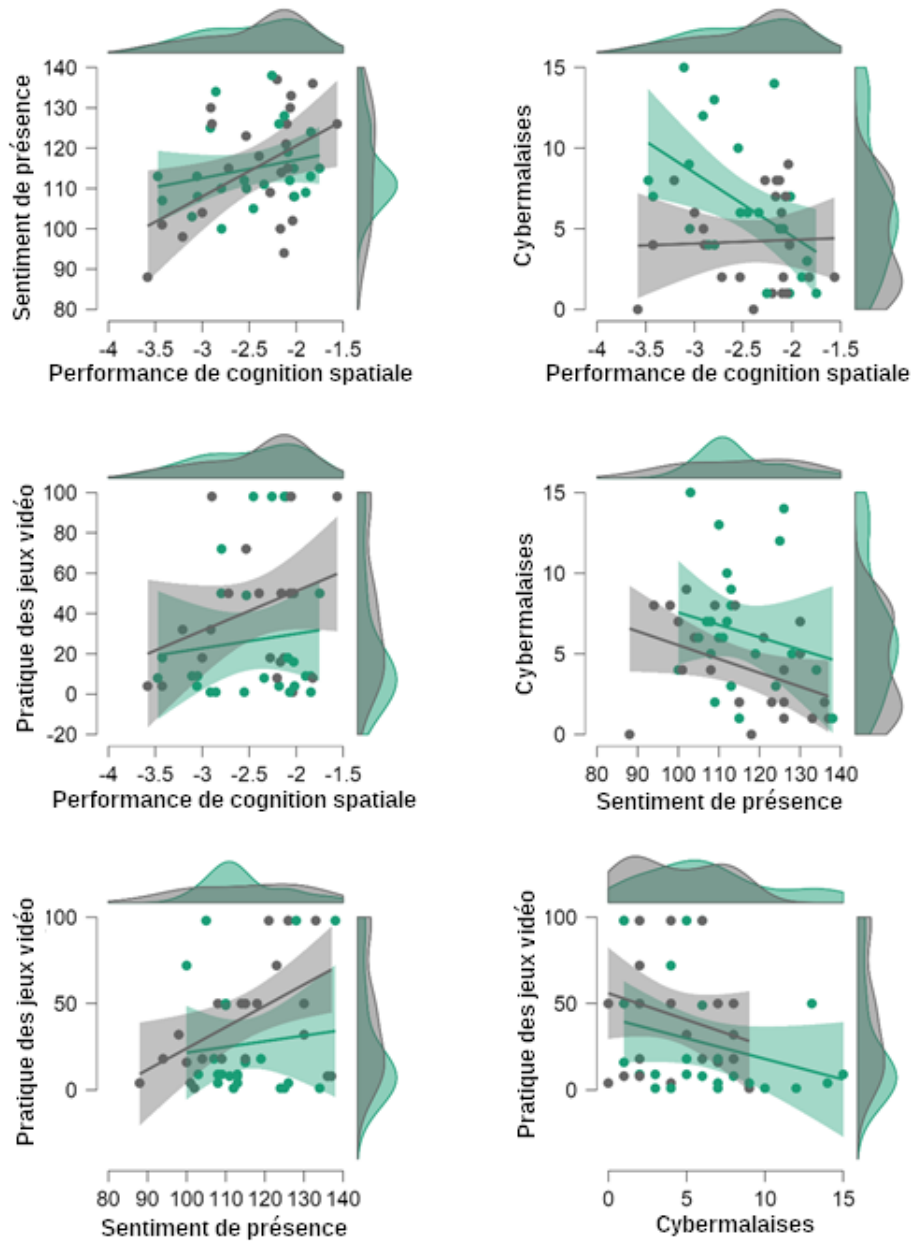


Figure 18. – Représentation graphique des principales corrélations divisées selon le genre (vert : femmes, gris : hommes) incorporant les graphiques de densité, la ligne de régression et les intervalles de confiance dans l'étude Spatioprésence (95%).

4.2.3. Analyse en composantes principales

Considérant que la dépendance au champ n'est corrélée à aucune variable et considérant la taille relativement réduite de l'échantillon, celle-ci n'a pas été intégrée dans l'analyse en composantes principales. Une seule composante avec valeur propre supérieure à 1 ($RC1 : 1.89$) a été extraite par l'analyse par composants principaux (Figure 9). $RC1$ explique 47.3% de la variance totale. $RC1$ est composée positivement du sentiment de présence (contribution = .73), de la performance de cognition spatiale (contribution = .67) et de la pratique des jeux vidéo (Contribution = .672) ainsi que négativement des cybermalaises (contribution = -.67).

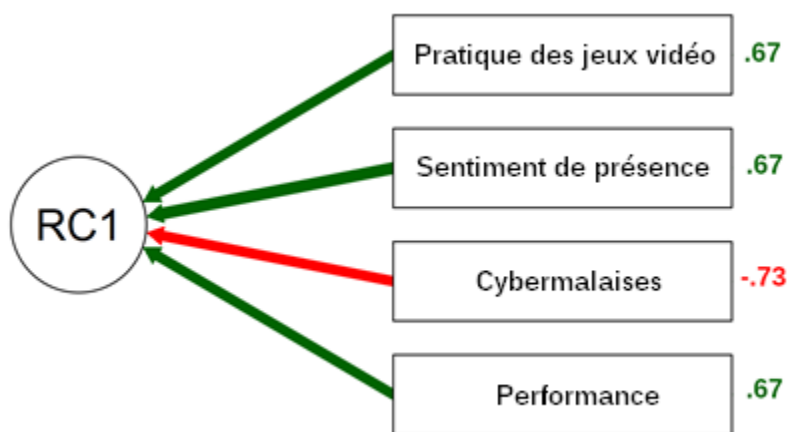


Figure 19. – Représentation graphique de l'analyse en composantes principales de l'étude Spatioprésence. Illustration de la contribution de chacune des variables à la première composante principale (vert : contribution positive, rouge : contribution négative).

4.2.4. Régressions linéaires

4.2.4.1. Performance de cognition spatiale

Le sentiment de présence est un prédicteur significatif positif de la performance de cognition spatiale ($\beta = .389$, $t(45) = 2.79$, $p = .009$), aux côtés des cybermalaises ($\beta = -.404$, $t(45) = 2.348$, $p = .024$) et d'une interaction entre cybermalaises et genre ($\beta = .533$, $t(45) = 2.295$, $p = .027$). Le genre ne montrant aucun effet simple sur la performance de cognition spatiale. Ce modèle explique une proportion significative de la variance de performance de cognition spatiale, $R^2 = .263$, $F(1, 45) = 3.739$, $p = .011$, $f^2 = .356$. Afin d'explorer cette interaction, des corrélations de Pearson et un test t de Student ont été réalisés séparément entre les genres, révélant une corrélation significative entre performance de cognition spatiale et cybermalaises chez les femmes ($r = .5$, $p = .013$) inexistante chez les hommes. De façon similaire, les femmes montrent un score brut aux

cybermalaises (6.41 ± 2.96) significativement inférieur à celui des hommes (4.21 ± 2.96) : $t(45) = 2.11$, $p = .04$, d de Cohen = 0.61.

4.2.4.2. Sentiment de présence

La pratique des jeux vidéo prédit de façon significative le sentiment de présence $\beta = 0.326$, $t(45) = 2.31$, $p = .026$. Ce modèle explique une proportion significative de la variance du sentiment de présence, $R^2 = .106$, $F(1, 45) = 5.338$, $p = .026$, $f^2 = .118$.

4.2.4.3. Cybermalaises

La pratique des jeux vidéo prédit de façon significative les cybermalaises $\beta = -.32$, $t(45) = -2.29$, $p = .028$. Ce modèle explique une proportion significative de la variance des cybermalaises, $R^2 = .105$, $F(1, 45) = 5.256$, $p = .027$, $f^2 = .117$.

4.2.4.4. Analyses de médiation

Seuls les cybermalaises et la pratique des jeux vidéo ont été retenus pour l'analyse de médiation. En effet, étant les seules variables corrélées à la fois au sentiment de présence et à la performance de cognition spatiale, elles étaient les seules potentiellement susceptibles de modérer la relation entre présence et performance. Cependant, ni les cybermalaises (z -value = 1.01, $p = .312$, 95% IC [-0.002, 0.003]) ni les jeux vidéo (z -value = 0.495, $p = .62$, 95% IC [-0.002, 0.003]) ni les deux combinés (z -value = 1.22, $p = .223$, IC [-0.002, 0.007]) n'ont révélé une médiation sur la relation entre sentiment de présence et performance de cognition spatiale.

4.3. Nav(i)r : étude sur l'évolution de la dépendance au champ

4.3.1. Le sentiment de présence

4.3.1.1. Présence historique et présence spatiale

Les trois questions sous forme d'échelles de Likert composant la construction présence historique présentent une forte cohérence interne et fiabilité avec un oméga ω de McDonald de .855. Ils ont donc été intégrés en une même dimension de moyenne 14.08 et d'écart-type 3.73. Cette présence historique est significativement corrélée à la présence spatiale ($r = .344, p = .001$) et présente une fiabilité cohérente avec celle trouvée au sein des sous-items de la présence spatiale ($\omega = .533$ sans la présence historique, $\omega = .529$ avec la présence historique). De plus, la sous-échelle de la présence historique est significativement et fortement corrélée à la sous-échelle Réalisme du Questionnaire sur l'Etat de Présence ($r = .449, p = .001$). La présence historique a donc été ajoutée au score du Questionnaire sur l'Etat de Présence pour les analyses futures de cette étude.

4.3.1.2. Dimensions de présence

4.3.1.2.1. Dépendance et évolution de la dépendance au champ

Le ratio d'évolution de la dépendance au champ n'est corrélé à aucune sous-échelle du Questionnaire sur l'Etat de Présence, à l'exception de la dimension Réalisme ($r = .192, p = .029$). La dépendance à l'égard du champ seule n'est corrélée que de manière tendancielle avec la dimension Réalisme ($r = .136, p = .091$).

4.3.1.2.2. Cybermalaises

Le score de cybermalaise est négativement corrélé à toutes les sous-échelles du Questionnaire sur l'Etat de Présence, à l'exception de l'échelle Réalisme: avec la dimension Possibilité d'agir ($r = -.402, p = .001$), avec la Qualité de l'interface ($r = -.347, p = .001$), avec la Possibilité d'examiner ($r = -.251, p = .006$), avec l'Auto-évaluation de la performance ($r = -.291, p = .002$) et tendanciellement avec la dimension Auditif ($r = -.162, p = .056$).

4.3.1.2.3. Expérience des jeux vidéo

La variable expérience des jeux vidéo est positivement corrélée à toutes les sous-échelles du Questionnaire sur l'Etat de Présence, à l'exception de l'échelle Réalisme et Auditif : avec la Qualité de l'interface ($r = .201, p = .023$), avec la Possibilité d'examiner ($r = .223, p = .014$), avec l'Auto-

évaluation de la performance ($r = .303, p = .001$) et tendancielle avec la Possibilité d'agir ($r = .159, p = .059$).

4.3.2. Mesures de la pratique des jeux vidéo

4.3.2.1. Fréquence de pratique des jeux vidéo

La fréquence de pratique des jeux vidéo telle qu'évaluée par l'échelle de Likert (1, 7) présente une moyenne de 3.76 ± 1.97 . Les femmes (3.25 ± 1.92) rapportent jouer quantitativement et significativement moins que les hommes (4.31 ± 1.90) : $t(97) = -2.749, p = .007, d$ de Cohen = -0.556 .

4.3.2.2. Types de jeux vidéo pratiqués

Parmi les 98 participants, 70 (27 femmes, 43 hommes) rapportent jouer à au moins un des trois jeux considérés comme intensifs, alors que 28 (24 femmes, 4 hommes) rapportent ne jouer à aucun de ces jeux. Cette différence est significative dans le sens où les hommes jouent significativement plus à des jeux intensifs: $t(97) = 4.61, p = .001, d$ de Cohen = 0.934

4.3.2.3. Pratique des jeux vidéo

Le type de jeux vidéo pratiqués associé à la fréquence de pratique de ces jeux vidéo présente une relativement bonne cohérence et fiabilité (ω de McDonald de $.751$). Ces deux variables sont positivement corrélées ($r = .602, p = .001$). La construction de l'expérience des jeux vidéo (fréquence des jeux vidéo doublée pour les individus rapportant pratiquer les jeux intensifs) rapporte une moyenne de 6.99 ± 4.43 . Les femmes (5.56 ± 4.38) présentent sur cette construction un score significativement plus bas que les hommes (8.53 ± 3.98) : $t(97) = -3.49, p = 0.001, d$ de Cohen = -0.706 .

4.3.2.4. Comparaisons entre les variables de l'étude et les mesures relatives à la pratique des jeux vidéo

Le tableau suivant (Tableau 4) relève les associations entre les différentes variables de l'étude selon leur coefficient de corrélation r et leur valeur p , notamment au vue des deux mesures du rapport de l'individu avec les jeux vidéo : fréquence des jeux vidéo seule et pratique des jeux vidéo (fréquence et types de jeux vidéo pratiqués).

		Sentiment de présence	Cybermalaises	Dépendance au champ (A)	Ratio d'évolution	Genre	Fréquence de jeux
Cybermalaises	<i>r</i>	-.369					
	<i>p</i>	.001					
Dépendance au champ (A)	<i>r</i>	.063	.133				
	<i>p</i>	.269	.097				
Ratio d'évolution	<i>r</i>	.187	-.186	-.203			
	<i>p</i>	.033	.034	.023			
Genre	<i>r</i>	.011	-.254	-.25	.024		
	<i>p</i>	.457	.006	.007	.406		
Fréquence de pratique des jeux vidéo	<i>r</i>	.111	-.24	-.101	.101	.27	
	<i>p</i>	.138	.009	.162	.16	.004	
Pratique des jeux vidéo	<i>r</i>	.135	-.27	-.1	.093	.336	.978
	<i>p</i>	.093	.004	.164	.182	.001	.001

Tableau 4. – Matrice de corrélations de Pearson entre les différentes variables de l'étude Nav(ir) et la fréquence de la pratique des jeux vidéo, d'une part, et la pratique des jeux vidéo, d'autre part (coefficient de corrélation *r* et valeur *p*).

4.3.1 Evolution de la dépendance au champ

4.3.1.1 Evolution globale de la dépendance au champ

Le test *t* de Student pour échantillons appariés a révélé, sur l'ensemble de l'échantillon, des différences significatives entre les niveaux de dépendance au champ avant (A) l'immersion et après (B) l'immersion ($t(97) = 5.76$, $p = .001$, d de Cohen = 0.58) dans le sens où la dépendance au champ après l'immersion (6.152 ± 3.06) est inférieure à la dépendance au champ avant l'immersion (5.52 ± 2.736).

4.3.1.2. Composition des groupes

Le ratio d'évolution de la dépendance au champ sur l'ensemble de l'échantillon présente une moyenne de $-.08 \pm .19$. Le premier groupe, le groupe évol- est composé de 47 individus présentant une diminution de leur dépendance au champ ($> 10\%$). Ce groupe possède un score au Test de la Baguette et du Cadre (A) de 6.7 ± 3.19 et (B) de 5.24 ± 2.67 . Le deuxième groupe, le groupe évol0 composé de 36 individus ne présentant ni diminution ni augmentation de leur dépendance au champ ($> -10\%$ et $< 10\%$) présente une moyenne lors de la mesure (A) de 6.45 ± 2.72 et lors de la mesure (B) de 6.32 ± 2.66 . Le dernier groupe, le groupe évol+, correspond aux 15 individus ayant augmenté leur dépendance à l'égard du champ (au moins 10%). Ce groupe présente une

moyenne lors de la mesure (A) de 3.60 ± 2.19 et lors de la mesure (B) de 4.34 ± 2.66 . La répartition de l'échantillon en ces trois groupes est représentée visuellement dans la Figure 20.

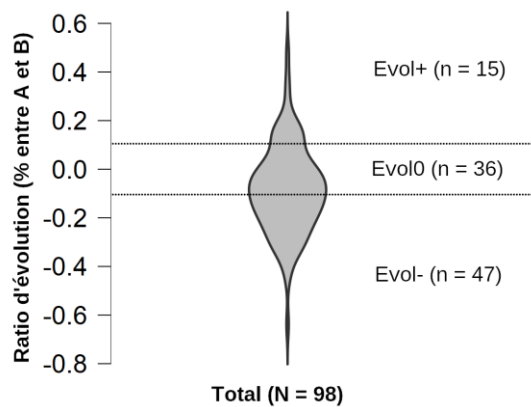


Figure 20. – Représentation graphique en violon de la répartition de l'échantillon de l'étude Nav(i)r en trois groupes différents selon leur ratio d'évolution de la dépendance au champ avant (A) et après (B) l'immersion en réalité virtuelle.

4.3.1.3. Comparaisons intra-groupes

Le test t de Student pour échantillons appariés au sein du groupe évol- montre une différence significative entre les mesures de dépendance au champ avant et après immersion ($t(46) = 11.38$, $p = .001$, d de Cohen = 1.66), dans le sens de cette diminution. A l'inverse, au sein du groupe évol+ il existe une différence significative entre les mesures (A) et (B) dans le sens de cette augmentation ($t(14) = -4.54$, $p = .001$, d de Cohen = -1.17). Il n'existe pas de différence entre les deux mesures au sein du groupe évol0.

4.3.1.4. Comparaison intergroupes

4.3.1.4.1. Dépendance au champ pré-immersion (A)

L'ANOVA a révélé un effet groupe pour la dépendance au champ avant immersion ($F(2,95) = 6.88$, $p = 0.002$, $\eta^2 = .13$, Figure 21). Le test post-hoc de Tuckey montre que le groupe évol+ présente une dépendance au champ (A) significativement inférieure à celle observée au sein des deux autres groupes (évol- : $t = 3.6$, $p = .001$; évol0 : $t = 3.24$, $p = .005$).

4.3.1.4.2. Dépendance au champ post-immersion (B)

L'ANOVA a révélé un effet groupe pour la dépendance au champ après immersion ($F(2,95) = 3.53$, $p = .033$, $\eta^2 = .07$, Figure 21). Le test post-hoc de Tuckey montre que le groupe expérimental évol+ présente une dépendance au champ post-immersion significativement inférieure au groupe

évol0 ($t = 2.02, p = .04$). Cependant, il n'existe pas de différence de dépendance au champ sur la mesure post immersion entre les groupes évol- et évol+.

4.3.1.4.3. Cybermalaises

L'ANOVA a révélé un effet groupe pour les cybermalaises ($F(2,95) = 4.06, p = .02, \eta^2 = .08$, Figure 21). Le test post-hoc de Tuckey montre que le groupe expérimental évol+ présente un niveau de cybermalaises significativement inférieur au groupe évol- ($t = 2.84, p = .015$) ainsi que tendanciellement inférieur au groupe évol0 ($t = 2.23, p = .071$).

4.3.1.4.4. Sentiment de présence spatiale

L'ANOVA a révélé un effet groupe pour le sentiment de présence ($F(2,95) = 3.263, p = .043, \eta^2 = 0.064$). Le test post-hoc de Tuckey montre que le groupe expérimental évol+ présente un niveau de présence significativement supérieur au groupe évol- ($t = -2.42, p = .045$) ainsi que tendanciellement supérieur au groupe évol0 ($t = -2.32, p = .057$).

4.3.1.4.5. Sentiment de présence spatiale et historique

Lorsque la sous-échelle présence historique est ajoutée au score au Questionnaire sur l'Etat de Présence, l'ANOVA révèle un effet groupe pour le sentiment de présence ($F(2,95) = 4.49, p = .014, \eta^2 = 0.086$, Figure 21). Le test Post-Hoc de Tuckey montre que le groupe expérimental évol+ présente un niveau de présence significativement supérieur au groupe évol- ($t = -2.72, p = .021$) ainsi qu'au groupe évol0 ($t = -2.845, p = .015$). Cette mesure du sentiment de présence semble donc plus discriminante que la mesure de présence spatiale seule.

4.3.1.4.6. Autres comparaisons

Il n'existe pas d'effet du genre ou de la pratique des jeux vidéo sur l'évolution de la dépendance au champ.

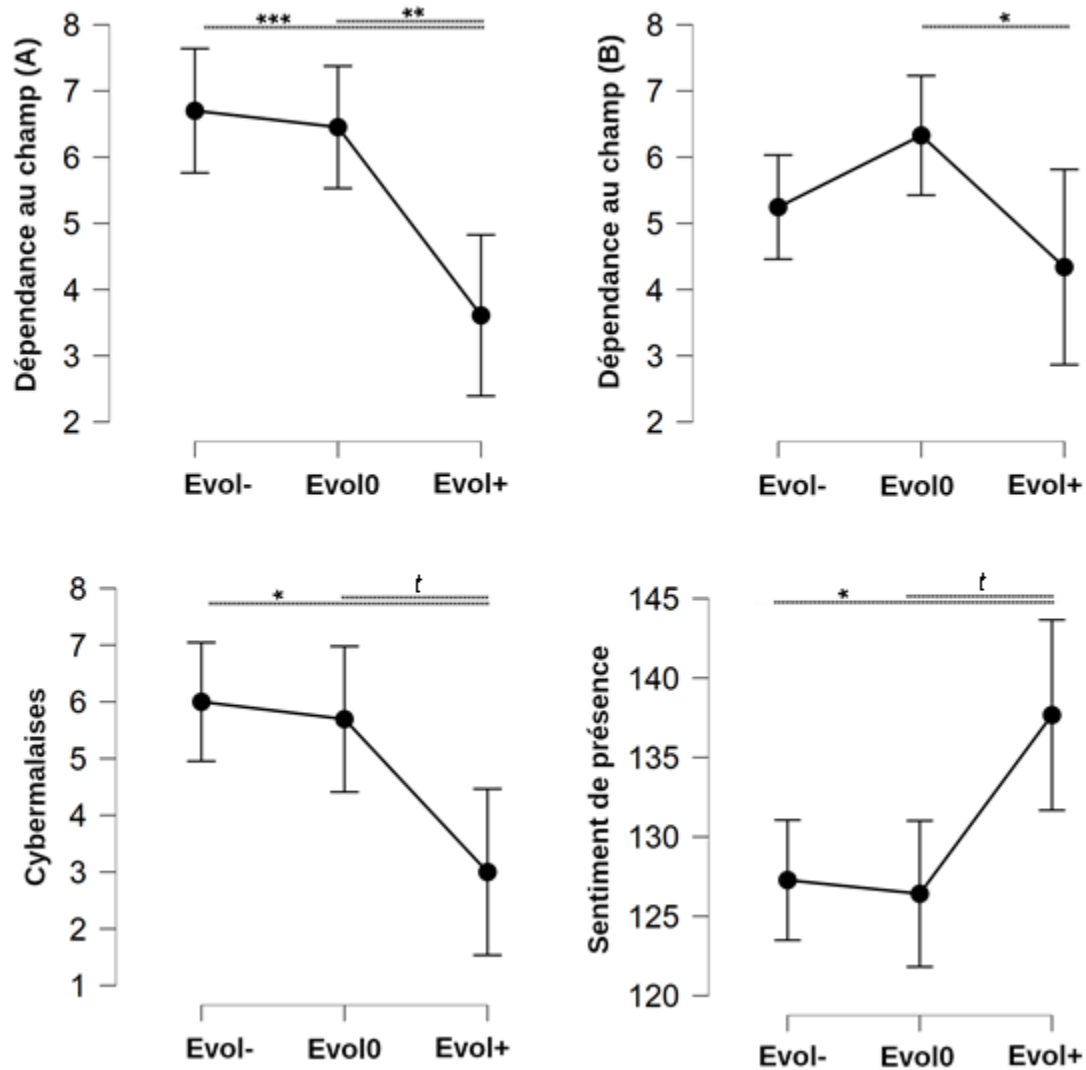


Figure 21. – Représentations graphiques des résultats des ANOVAs sur les variables – dépendance au champ pré-immersion et (A) et post-immersion (B), cybermalaises et sentiment de présence selon les groupes de l'étude Nav(i)r : Evol- = diminution de la dépendance au champ, Evol0 = absence d'évolution de la dépendance au champ, Evol+ = augmentation de la dépendance au champ. La significativité est soulignée ainsi : *** = $p < .001$, ** = $p < .01$, * = $p < .05$, ^(t) = $p < .1$.

4.4. Eduprésence : étude sur l'apprentissage

4.4.1. Analyses préliminaires

4.4.1.1. Présence historique

La somme des scores aux 9 questions restantes du Questionnaire sur l'Etat de Présence était positivement et fortement associée à la somme des scores aux 3 items ajoutés concernant la présence historique ($r = .55$, $p = .001$). L'indice de fiabilité (oméga de McDonald) entre ces 11 questions a été calculé à $\omega = .823$. Ces questions ont donc été ajoutées aux items originaux pour former une seule variable numérique du sentiment de présence.

4.4.1.2. Mesures de l'expérience des jeux vidéo

4.4.1.2.1. Fréquence de la pratique des jeux vidéo

La mesure de la fréquence de la pratique des jeux vidéo (question de Likert de 1 à 7) révèle une moyenne de 3.47 ± 2.01 . Les hommes ($5, \pm 1.82$) rapportent jouer davantage que les femmes (2.57 ± 1.53) : $t(65) = -5.83$, $p = .001$, d de Cohen = 1.475.

4.4.1.2.2. Expérience vidéoludique

Concernant la construction de l'expérience vidéoludique, les différentes sous composantes lorsque assemblées présentent une moyenne de 9.82 ± 8.03 et un oméga de McDonald relativement faible ($\omega = .577$). Cette expérience vidéoludique est fortement corrélée à la fréquence de pratique des jeux vidéo ($r = .833$, $p = .001$). Les moyennes aux différents sous composants sont les suivants : visionnage de films 3D (1.68 ± 0.679) pratique de la réalité virtuelle (1.41 ± 0.81), pratique de jeux intensifs (25 oui, 42 non), pratique de jeux sur ordinateurs ou consoles de salon (51 oui, 16 non), nombre d'heures passées à jouer aux jeux vidéo par semaine (5.58 ± 7.56). Sur cette construction d'expérience vidéoludique, les hommes (16.32 ± 9.31) rapportent davantage d'expérience que les femmes (5.95 ± 3.47) : $t(65) = 6.52$, $p = .001$, d de Cohen = 1.64.

4.4.1.2.3. Corrélations entre les variables de l'étude et les mesures relatives à l'expérience des jeux vidéo

Le Tableau 5 présente les corrélations entre les variables de l'étude et la fréquence de pratique des jeux vidéo, d'une part, et l'expérience vidéoludique, d'autre part.

Performance d'apprentissage	Sentiment de présence	Cyber-malaises	Intérêt	Dépendance au champ	Genre	Fréquence de pratique
-----------------------------	-----------------------	----------------	---------	---------------------	-------	-----------------------

Sentiment de présence	<i>r</i>	.194						
	<i>p</i>	.058						
Cybermalaises	<i>r</i>	-.017	-.182					
	<i>p</i>	.446	.071					
Intérêt	<i>r</i>	.319	.347	-.023				
	<i>p</i>	.004	.002	.426				
Dépendance au champ	<i>r</i>	-.132	.009	-.031	.109			
	<i>p</i>	.143	.597	.806	.191			
Genre	<i>r</i>	.046	-.114	-.229	-.110	-.015		
	<i>p</i>	.357	.178	.031	.377	.452		
Fréquence de pratique des jeux vidéo	<i>r</i>	.082	.176	-.045	-.020	-.081	.586	
	<i>p</i>	.254	.078	.359	.871	.258	< .001	
Expérience vidéoludique	<i>r</i>	.109	.256	-.216	.051	.004	.629	.833
	<i>p</i>	.189	.018	.04	.684	.488	< .001	< .001

Tableau 5. – Matrice de corrélations de Pearson entre les différentes variables de l'étude Eduprésence et la fréquence de pratique des jeux vidéo, d'une part, et l'expérience vidéoludique, d'autre part (coefficient de corrélation *r* et valeur *p*).

4.4.2. Matrice de corrélations

La matrice de corrélations entre les différentes variables de cette étude peut être retrouvée dans le Tableau 5. Puisque l'expérience vidéoludique semble largement plus intégrée et discriminante que la fréquence de pratique des jeux vidéo seule, celle-ci sera utilisée comme variable pour le reste des analyses. De plus, et contrairement aux hypothèses de départ, il n'existe pas d'association entre dépendance au champ et cybermalaises. Considérant que la dépendance au champ n'était associée ni significativement ni tendanciellement à aucune autre variable, elle n'a pas été retenue pour l'analyse par composantes principales.

4.4.3. Analyse en composantes principales

Deux composants avec des valeurs propres supérieures à 1 (*RC1* : 1.72 et *RC2* : 1.16) ont été extraites par l'analyse par composants principaux (Figure 12). *RC1* et *RC2* expliquent ensemble 58% de la variance totale. *RC1* (34% de la variance) est composée positivement du sentiment de présence (contribution = .52), de la performance d'apprentissage (contribution = .74) ainsi que de

l'intérêt pour le contenu historique (contribution = .83). RC2 (23% de la variance) est composée négativement des cybermalaises (contribution = -.78) et positivement de l'expérience vidéoludique (contribution = .73) et du sentiment de présence (contribution = .42). Les deux composantes sont positivement corrélées ($r = .228$).

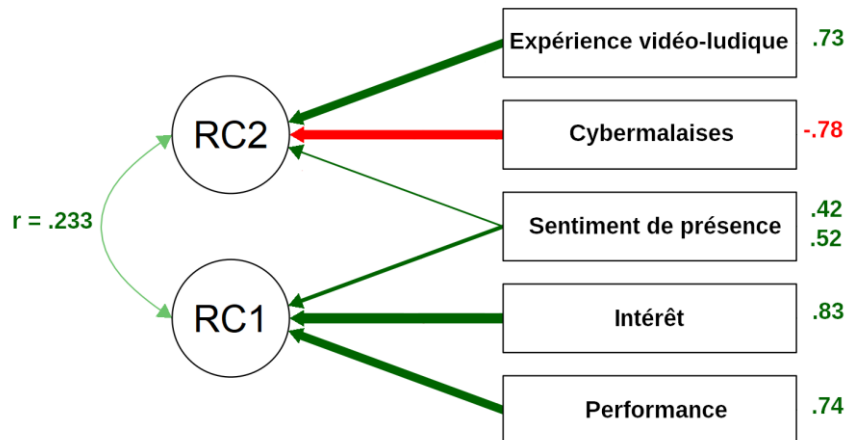


Figure 22. – Représentation graphique de l'analyse en composantes principales, de la contribution de chacune des variables aux deux composantes (vert : contribution positive, rouge : contribution négative) ainsi que de la corrélation entre les deux composantes dans l'étude Eduprésence.

4.4.4. Régressions linéaires

4.4.4.1. Transfert de connaissance

L'intérêt pour le contenu historique est un prédicteur significatif de la performance de cognition spatiale $\beta = .32$, $t(65) = 2.72$, $p = .008$. L'intérêt pour le contenu historique explique une proportion significative de la variance de performance de cognition spatiale, $R^2 = .1$, $F(1, 65) = 7.38$, $p = .008$, $f^2 = .111$.

4.4.4.2. Sentiment de présence

L'intérêt pour le contenu historique est un prédicteur significatif positif du sentiment de présence ($\beta = .35$, $t(64) = 2.95$, $p = .004$) aux côtés de l'expérience vidéoludique ($\beta = .239$, $t(64) = 2.10$, $p = .039$). Ce modèle explique une proportion significative de la variance du sentiment de présence : $R^2 = .178$, $F(2, 64) = 6.91$, $p = .002$, $f^2 = .216$.

4.4.4.3. Cybermalaises

L'expérience des jeux vidéo est un prédicteur significatif des cybermalaises ($\beta = -.26$, $t(64) = -2.166$, $p = .034$) aux côtés d'une tendance de la distance par rapport au point de référence stéréoscopique ($\beta = -.228$, $t(64) = 1.879$, $p = .065$). L'expérience des jeux vidéo couplée à la distance par rapport au point de référence stéréoscopique expliquent une proportion significative de la variance des cybermalaises, $R^2 = .096$, $F(2, 64) = 3.41$, $p = .039$, $f^2 = .106$.

4.4.4.4. Analyses de médiation

Aucune variable n'a d'effet de médiation sur la relation entre sentiment de présence et transfert de connaissance, puisque cette dernière n'est pas significative lors des analyses par régression linéaire.

4.5. Analyses transversales

4.5.1. Analyses intragroupes

4.5.1.1. Sentiment de présence

4.5.1.1.1. Neuroprésence

Le Questionnaire sur l'Etat de Présence de l'étude Neuroprésence (sans les items sur le son ou l'haptique) présente une moyenne de 105.92 ± 9.85 . Comparée à la moyenne de l'échantillon de référence du Questionnaire sur l'Etat de Présence (91.96), un test t de Student pour échantillon seul indique une différence significative dans le sens où les participants de Neuroprésence rapportent davantage de présence que ceux de l'échantillon de référence ayant servi à la conception du questionnaire : $t(53) = 10.37$, $p = .001$, d de Cohen = 1.41.

4.5.1.1.2. Spatioprésence

Le Questionnaire sur l'Etat de Présence de l'étude Spatioprésence (sans les items sur le son ou l'haptique) présente une moyenne de 101.1 ± 10.38 . Comparée à la moyenne de l'échantillon de référence du Questionnaire sur l'Etat de Présence (91.96), un test t de Student pour échantillon seul indique une différence significative dans le sens où les participants de Spatioprésence rapportent davantage de présence que ceux de l'échantillon de référence ayant servi à la conception du questionnaire : $t(46) = 5.39$, $p = .001$, d de Cohen = .59.

4.5.1.1.3. Eduprésence

Le Questionnaire sur l'Etat de Présence de l'étude Eduprésence ne peut pas être réellement comparé à l'échantillon de référence, car celui-ci a été modifié. Cependant, l'échelle réalisme est restée intacte et peut l'être : ce sous-item présente dans Eduprésence une moyenne de 35.4 ± 6.35 . Comparée à la moyenne de l'échantillon de référence au sous-item Réalisme du Questionnaire sur l'Etat de Présence (29.45), un test t de Student pour échantillon seul indique une différence significative dans le sens où les participants de Eduprésence rapportent davantage de présence que ceux de l'échantillon de référence ayant servi à la conception du questionnaire : $t(66) = 36.45$, $p = .001$, d de Cohen = 4.45.

4.5.1.2. Cybermalaises

4.5.1.2.1. Neuroprésence

Le Questionnaire sur les Cybermalaises de l'étude Neuroprésence présente une moyenne de 3.37 ± 2.96 . Comparée à la moyenne de l'échantillon de référence du Questionnaire sur les Cybermalaises (7.12), un test t de Student pour échantillon seul indique une différence significative dans le sens où les participants de Neuroprésence rapportent moins de cybermalaises que ceux de l'échantillon de référence ayant servi à la conception du questionnaire : $t(53) = -9.534$, $p = .001$, d de Cohen = -1.3.

4.5.1.2.2. Spatioprésence

Le Questionnaire sur les Cybermalaises de l'étude Spatioprésence présente une moyenne de 5.3 ± 3.67 . Comparée à la moyenne de l'échantillon de référence du Questionnaire sur les Cybermalaises (7.12), un test t de Student pour échantillon seul indique une différence significative dans le sens où les participants de Spatioprésence rapportent moins de cybermalaises que ceux de l'échantillon de référence ayant servi à la conception du questionnaire : $t(46) = -3.4$, $p = .001$, d de Cohen = -0.49.

4.5.1.2.3. Eduprésence

Le Questionnaire sur les Cybermalaises de l'étude Eduprésence présente une moyenne de 5.3 ± 3.9 . Comparée à la moyenne de l'échantillon de référence du Questionnaire sur les Cybermalaises (7.12), un test t de Student pour échantillon seul indique une différence significative dans le sens où les participants de Eduprésence rapportent moins de cybermalaises que ceux de l'échantillon de référence ayant servi à la conception du questionnaire : $t(66) = -3.6$, $p = .001$, d de Cohen = -0.449.

4.5.2. Analyses intergroupes

4.5.2.1. Sentiment de présence

L'ANOVA à un facteur sur l'expérimentation (Neuroprésence, Spatioprésence) révèle un effet simple de la variable expérimentation $F(1,99) = 8.7$, $p = .004$, $\eta^2 = .08$ sur les taux de présence rapportés non normalisés. Le test post-hoc de Tuckey révèle un effet significatif dans le sens où les individus de l'expérimentation Neuroprésence rapportent davantage de présence ($t = 2.95$, $p = .004$, d de Cohen = 0.58) que ceux de l'expérimentation Spatioprésence.

4.5.2.2. Cybermalaises

L'ANOVA à un facteur sur l'expérimentation (Neuroprésence, Spatioprésence, Eduprésence) révèle un effet simple de la variable expérimentation $F(2,162) = 6.16, p = .003, \eta^2 = .07$ sur le taux de cybermalaises rapportés non normalisés. Le test post-hoc de Tuckey révèle un effet significatif dans le sens où les individus de l'expérimentation Neuroprésence rapportent moins de cybermalaises que ceux des expérimentations Spatioprésence ($t = 2.89, p = .012, d$ de Cohen = 0.62) et Eduprésence ($t = 3.18, p = .005, d$ de Cohen = 0.59).

4.5.3. Analyses agrégées

4.5.3.1. Matrice de corrélation

Le tableau suivant (Tableau 6) montre les différentes corrélations sur données standardisées, entre données par expérimentation et données agrégées.

Corrélations de Pearson sur données normalisées		Performance	Sentiment de présence	Cybermalaises	Pratique des jeux vidéo	Dépendance au champ
Sentiment de présence	Neuroprésence	.003				
	Spatioprésence	.369**				
	Eduprésence	.194 ^(t)				
	Total	.190**				
Cybermalaises	Neuroprésence	-.225 ^(t)	-.217 ^(t)			
	Spatioprésence	-.278*	-.273*			
	Eduprésence	-.017	-.182 ^(t)			
	Total	-.153*	-.220**			
Pratique des jeux vidéo	Neuroprésence	.043	.148	-.133		
	Spatioprésence	.194 ^(t)	.214 ^(t)	-.321*		
	Eduprésence	.082	.176 ^(t)	-.045		
	Total	.102 ^(t)	.179*	-.151*		
Dépendance au champ	Neuroprésence	.024	-.234*	.252*	-.495***	
	Spatioprésence	-.114	.066	.169	-.090	
	Eduprésence	-.132	.009	-.031	-.081	
	Total	-.080	-.042	.108 ^(t)	-.209**	
Genre	Neuroprésence	.276*	.116	-.145	.523***	-.427***
	Spatioprésence	.064	.020	-.301*	.228 ^(t)	-.240 ^(t)
	Eduprésence	.046	-.114	-.229*	.586***	-.015
	Total	.123	-.004	-.225**	.461***	-.207**

Tableau 6. – Matrice de corrélations de Pearson entre les différentes variables des différentes études (Neuroprésence, Spatioprésence, Eduprésence) ainsi que des données agrégées. La significativité est soulignée ainsi : *** = $p < .001$, ** = $p < .01$, * = $p < .05$, ^(t) = $p < .1$.

4.5.3.2. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales a extrait deux composantes principales avec des valeurs propres supérieures à 1, *RC1* (1.58) et *RC2* (1.025) comme représenté graphiquement sur la Figure 23. *RC1* et *RC2* expliquent ensemble 52% de la variance totale. *RC1* (32% de la variance) est composée négativement des cybermalaises (contribution = -.60), et positivement de la performance (contribution = .65) et de la présence (contribution = .75). *RC2* (20% de la variance) est composée négativement de la dépendance à l'égard du champ (contribution = -.88) et positivement de la pratique des jeux vidéo (.66). Les deux composantes sont positivement corrélées ($r = .258$). La distribution de chacune des observations selon le genre est graphiquement représentée dans la Figure 24.

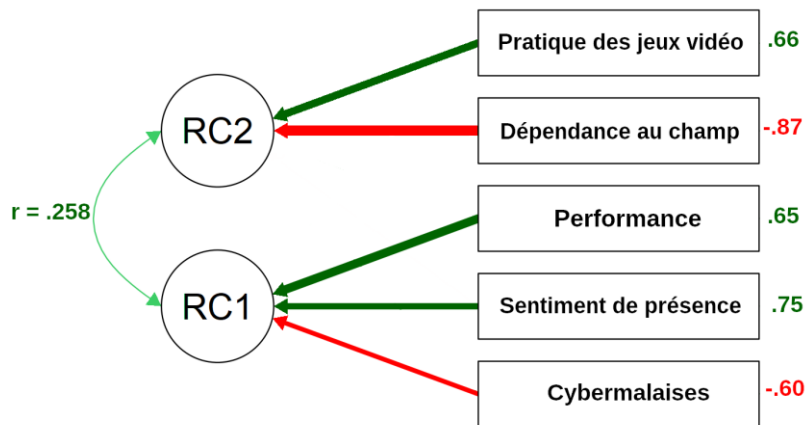


Figure 23. – Représentation graphique de l'analyse en composantes principales sur les données agrégées, de la contribution de chacune des variables aux deux composantes (vert : contribution positive, rouge : contribution négative) ainsi que de la corrélation entre les deux composantes.

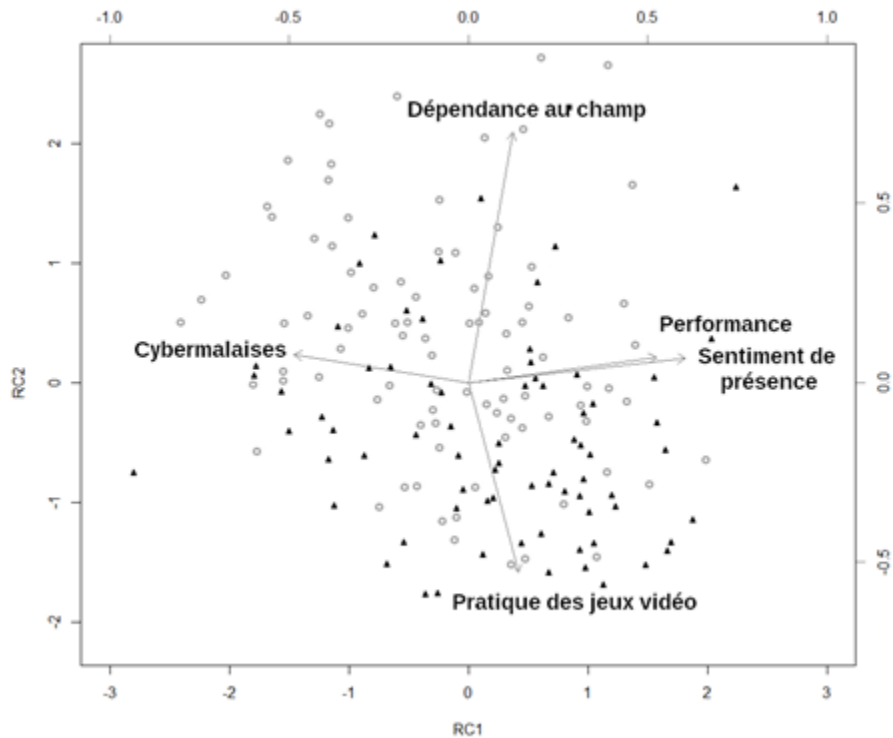


Figure 24. – Représentation graphique des deux composantes (valeurs propres ≥ 1 , RC1: 32% de variance, RC2: 20% de variance) extraites de l'analyse en composantes principales sur quatre facteurs humains (i.e. dépendance au champ, cybermalaises, sentiment de présence, pratique des jeux vidéo) et la performance sur les données agrégées des trois études expérimentales. Les triangles noirs représentent les hommes et les ronds gris les femmes.

4.5.3.3. Régressions linéaires

4.5.3.3.1. Performance

Le sentiment de présence est le seul prédicteur significatif de la performance globale avec valeurs normalisées : $\beta = 0.19$, $t(164) = 2.48$, $p = .014$. Ce modèle explique une proportion significative de la variance, $R^2 = .036$, $F(1,164) = 6.175$, $p = .014$, $f^2 = .0373$. La régression contrôle n'a révélé aucun effet de la durée d'immersion ou de l'âge des participants sur la performance.

4.5.3.3.2. Sentiment de présence

Le sentiment de présence est significativement prédit par les cybermalaises ($\beta = -0.197$, $t(163) = -2.579$, $p = .011$) aux côtés de la pratique des jeux vidéo ($\beta = 0.15$, $t(163) = 2.01$, $p = .047$). Ce modèle explique une proportion significative de la variance du sentiment de présence : $R^2 = .075$,

$F(2,163) = 6.151, p = 0.003, f^2 = .081$. La régression contrôle n'a révélé aucun effet de la durée d'immersion ou de l'âge des participants sur le sentiment de présence.

4.5.3.3.3. Cybermalaises

Les symptômes de cybermalaises sont significativement prédits par la régression présentée dans le Tableau 7. Ce modèle explique une proportion significative de la variance des cybermalaises : $R^2 = .098, F(7,158) = 2.449, p = 0.021, f^2 = .108$.

Régression linéaire cybermalaises	β	t	p
Dépendance au champ	0.115	1.022	.309
Genre*	-0.189*	-2.150*	.033*
Pratique des jeux vidéo	-0.146	-1.168	.245
Dépendance au champ x Genre	-0.061	0.517	.606
Dépendance au champ x Pratique des jeux vidéo	0.067	0.546	.586
Genre x Pratique des jeux vidéo	0.093	0.773	.440
Dépendance au champ x Genre x Pratique des jeux vidéo*	-0.270*	-2.081*	.039*

Tableau 7. – Modèle prédicteur (régressions linéaires) des cybermalaises sur l'ensemble des données agrégées normalisées. Un astérisque signifie que le prédicteur est significatif à $p < .05$.

5. Discussion

La discussion de ce travail est articulée en plusieurs parties et correspond à la discussion théorique des résultats empiriques de chacune des études – Neuroprésence, Spatioprésence, Nav(i)r, Eduprésence – ainsi que des analyses transversales complémentaires. Cependant, malgré cette approche séquencée, les discussions des différents résultats suivent une démarche complémentaire et font référence les uns aux autres afin de non seulement éviter une redondance dans la discussion d'effets similaires mais aussi permettre d'aller plus loin dans les raisonnements, et ce en parallèle de l'exploration des données. La synthèse de ces discussions fait l'objet, sous la forme d'un modèle théorique, de la conclusion du présent travail. Elle est accompagnée de certaines recommandations destinées aux acteurs de la réalité virtuelle, ainsi que de perspectives de recherches.

5.1. Neuroprésence : étude sur les fonctions exécutives

5.1.2. Modalités, genre et performance

Le premier objectif de cette étude était de comparer la performance à un test de neuropsychologie classique évaluant les fonctions exécutives, le Wisconsin Card Sorting Test, soit en modalité réalité virtuelle soit en modalité traditionnelle papier-crayon, et cela selon le genre des participants. Les résultats montrent qu'il existe des différences à prendre en compte et à discuter. En effet, et même si en comparant l'ensemble il n'existe pas d'effet simple de la modalité ou du genre sur la performance au Wisconsin Card Sorting Test, les analyses réalisées montrent une interaction significative entre le genre et la modalité dans le sens où les hommes sont tendanciellement plus performants dans la modalité réalité virtuelle qu'ils ne le sont dans la modalité papier-crayon. Cet effet n'est pas retrouvé parmi les individus de genre féminin, ce qui laisse supposer que les hommes sont avantagés par la modalité réalité virtuelle. Il convient alors d'entrer plus en détail dans l'analyse de cette modalité afin de comprendre les différences pouvant amener à un tel effet.

5.1.3. Performance et facteurs humains en modalité virtuelle

Le second objectif de cette étude était d'analyser la performance au Wisconsin Card Sorting test lorsque réalisée en réalité virtuelle et de mettre cette performance en relation avec toute une série de facteurs humains annexes, suggérés comme pouvant impacter cette dernière (genre, sentiment de présence, cybermalaises, pratique des jeux vidéo, dépendance au champ). La première donnée à considérer lorsque l'on regarde les analyses au sein de ce groupe est qu'il existe une

association entre genre masculin et performance, et que, en accord avec les hypothèses, le genre est un prédicteur significatif de la performance au Wisconsin Card Sorting Test virtuel. Il convient de noter que cet effet, ainsi que sa puissance statistique, sont relativement faibles. Il demeure cependant important de prendre en compte le fait que les hommes de la modalité réalité virtuelle semblent non seulement plus performants que les hommes de la modalité papier-crayon, mais également plus performants que les femmes de la modalité réalité virtuelle. Au-delà de confirmer nos hypothèses a priori, ces différences font écho au titre explicite de Felnhofer et al., (2012) : *Is virtual reality for men only ? Exploring gender differences in the sense of presence*.

Ces différences de performance favorisant les hommes de la modalité réalité virtuelle – les femmes ayant une performance similaire dans les deux modalités – peuvent trouver leur explication dans l’articulation des différents facteurs humains. En effet, et en accord avec les hypothèses expérimentales a priori, les hommes de la modalité réalité virtuelle ont montré, via la comparaison des scores de l’analyse en composantes principales, un sentiment de présence et une fréquence de pratique des jeux vidéo globalement plus élevés, ainsi que des taux de cybermalaises et de dépendance au champ plus faibles que ceux des femmes. Or, ces quatre facteurs humains, comme le montre la deuxième composante de cette analyse, semblent promouvoir la performance au Wisconsin Card Sorting test virtuel. Il est intéressant de voir qu’aucun de ces facteurs, pris indépendamment, n’est assez fort pour être directement corrélé à la performance, et que seul le genre en est un prédicteur significatif. Cependant, pris ensemble, ces facteurs humains forment un tout, représenté dans l’étude par la première composante de l’analyse en composantes principales, corrélée à la composante de la performance. Cet ensemble pourrait être considéré comme la manifestation d’un profil cognitif (au sens perceptif, cognitif et moteur) qui influence l’expérience utilisateur, modulant ainsi la performance elle-même.

Le fait que les hommes présentent un profil cognitif et donc une expérience utilisateur plus favorable à la réalité virtuelle pourrait expliquer leur meilleure performance dans la modalité virtuelle. En effet, puisque cet effet n’existe pas lors de la réalisation du test classique, il est difficilement envisageable de considérer qu’il s’agit de différences dans la réalisation du test lui-même. Il est cependant intéressant de voir que bien que les hommes semblent favorisés en réalité virtuelle, le genre n’est ni prédicteur du sentiment de présence, ni des cybermalaises. En effet, la variance du sentiment de présence semble mieux expliquée par la fréquence de pratique des jeux vidéo et la dépendance au champ que par le genre lui-même, bien que ces deux effets soient davantage présents chez les hommes. De la même façon, la variance de la sensibilité aux cybermalaises semble mieux expliquée par une plus grande dépendance au champ, ce qui est, encore une fois,

généralement présent chez les femmes. Il est donc tout à fait possible que l'effet global relativement faible faisant de la variable genre un prédicteur de la performance en réalité virtuelle soit en fait un ensemble d'interactions d'autres variables pour lesquelles les hommes ont, en moyenne, des scores supérieurs, par exemple pour des raisons culturelles associant le jeu vidéo avec le genre masculin (Entertainment software association, 2019; Rosa et al., 2016) ou encore la pratique de jeux de construction 3D durant l'enfance entraînant l'indépendance à l'égard du champ (S. C. Levine et al., 2016).

Au sein du profil cognitif et de cette expérience utilisateur favorisant les hommes, les résultats semblent distinguer la dépendance au champ comme le point central de l'équation. En effet, non seulement la dépendance au champ est la seule variable corrélée à toutes les autres (cybermalaises, sentiment de présence, pratique des jeux vidéo, genre), mais elle est aussi le principal contributeur de la composante facteurs humains de l'analyse en composantes principales, le seul prédicteur significatif des cybermalaises ainsi qu'un prédicteur significatif (en interaction) du sentiment de présence. Cette donnée n'est pas surprenante considérant que la dépendance au champ accompagne des différences individuelles fortes, que ce soit par rapport à la perception spatiale (Farmaki et al., 2019) à l'intégration multisensorielle ou encore aux stratégies attentionnelles (Guisande et al., 2007), autant de concepts entremêlés avec les variables de notre étude. Il convient d'ajouter que la dépendance au champ semble largement associée à la pratique des jeux vidéo, et ce sans être un effet médié du genre, ce qui est, à notre connaissance, un résultat inédit, d'autant plus que les deux interagissent pour prédire significativement le sentiment de présence. Sans pouvoir l'affirmer, il est possible de poser l'hypothèse interprétative que la pratique des jeux vidéo entraîne les joueurs vers plus d'indépendance à l'égard du champ, par exemple en stimulant la cognition spatiale ou les capacités d'inhibition (Jia et al., 2014; Tascon et al., 2017). En effet, les jeux vidéo nécessitent souvent des capacités de cognition spatiale, que ce soit pour la navigation dans des mondes ouverts ou l'orientation par rapport à l'adversaire dans des jeux de tirs. De plus, les tâches des jeux vidéo sont accompagnées de nombreuses stimulations visuelles non pertinentes pour leur réalisation qu'il convient d'inhiber, par exemple les effets visuels où les décors dans les jeux de courses. Une autre explication pourrait être que la pratique des jeux vidéo poussent les individus à devenir moins dépendants à l'égard du champ afin de créer une habitude au conflit sensoriel, ce qui expliquerait la corrélation trouvée dans la littérature comme dans la présente étude, ainsi que les capacités prédictives de la dépendance au champ sur les cybermalaises. Dans ce contexte, cette moindre susceptibilité aux cybermalaises pourrait également entraîner plus de présence, association déjà vérifiée dans la littérature (Weech et al., 2019) et retrouvée tendanciellement dans la nôtre.

Un autre résultat inédit de cette étude correspond à l'association forte et négative entre sentiment de présence et dépendance au champ. Cette relation, conforme aux hypothèses de Hecht & Reiner (2007), qui ont testé l'association entre dépendance au champ et présence d'objets, peut s'expliquer de différentes manières. Tout d'abord, il peut effectivement s'agir d'un effet concomitant induisant l'interaction entre jeux vidéo et dépendance au champ ; les individus plus dépendants au champ étant également les moins joueurs de jeux vidéo. Cependant, les processus cognitifs affectés par la dépendance au champ sont très proches de ceux constitutifs du sentiment de présence : notamment la cognition spatiale et l'inhibition (Evans et al., 2013; Wirth et al., 2007). On peut par exemple supputer, comme le font Hecht & Reiner (2007), qu'un participant dépendant à l'égard du champ verra son taux de présence lourdement affecté par des défauts, notamment visuels, de l'environnement virtuel. Au contraire, un participant plus indépendant à l'égard du champ pourra faire appel à ses propres repères pour « fill the gaps » de l'environnement (Hecht & Reiner, 2007), et ainsi préserver un taux de présence plus élevé. Il est également possible d'arguer que les plus grandes capacités d'inhibition des participants indépendants à l'égard du champ leur permettent d'effacer les stimuli issus du monde physique pouvant nuire au sentiment de présence, par exemple le bruit de l'ordinateur ou d'autres sons parasites. Enfin, la relation positive entre sentiment présence et pratique des jeux vidéo, déjà suggérée dans la littérature (Gamito et al., 2008) et retrouvée dans nos analyses puisque l'expérience des jeux vidéo est le principal prédicteur du sentiment de présence, s'explique aisément. En effet, il convient de noter que les jeux vidéo, au-delà des aspects de cognition spatiale et d'inhibition évoqués précédemment et pouvant impacter le sentiment de présence, comportent un certain nombre de schèmes cognitifs et sensori-moteurs qui peuvent faciliter, par familiarité, l'émergence du sentiment de présence. Pour l'exemple, l'utilisation de manettes de jeux pour interagir avec un environnement virtuel est probablement grandement facilitée pour un joueur expérimenté, ce qui lui permet de réduire les ressources attentionnelles nécessaires à l'interface et donc lui permettre de davantage se focaliser sur l'environnement virtuel lui-même. Rappelons à ce propos la définition de la présence de Lombard & Ditton (1997) de l'illusion de non-médiation.

5.1.4. Effet du stress

Cet objectif exploratoire réalisé en comparant le stress rapporté par les participants et causés par le fait de se sentir évalué a révélé des différences significatives entre la modalité réalité virtuelle et la modalité papier-crayon. En effet, les participants de la modalité traditionnelle dont le déroulement comporte un face-à-face entre participant et expérimentateur ont rapporté s'être sentis davantage stressés par le fait d'être évalués que ceux de la modalité réalité virtuelle. Cet effet

peut s'expliquer facilement par le fait que les participants de la modalité réalité virtuelle étaient transportés dans un autre environnement dans lequel il était beaucoup plus simple d'oublier le laboratoire et l'expérimentateur. De plus, l'aspect vidéoludique de l'expérimentation (l'ambiance Far West de l'environnement associé à l'expérience, parfois inédite, de la réalité virtuelle) ont également pu contribuer à mitiger la sensation stressante de savoir son comportement observé, évalué et mesuré. Il est aussi possible d'ajouter que les participants de la modalité réalité virtuelle pouvaient penser que l'expérimentateur n'avait pas de regard sur leur performance, puisque réalisée dans le casque, alors qu'il n'y avait aucun doute pour les participants de la modalité traditionnelle que l'expérimentateur observait en direct leur performance comportementale.

De façon intéressante, le sentiment de stress ressenti et causé par le fait d'être évalué n'a pas été trouvé comme associé à la performance des individus, ni à la présence dans la modalité réalité virtuelle. Cependant, deux corrélations significatives ont été trouvées et méritent d'être discutées. La première est une association positive entre stress ressenti et dépendance à l'égard du champ dans les deux modalités : cet effet n'est pas surprenant considérant que la dépendance à l'égard du champ est souvent associée à des caractéristiques individuelles sociales, notamment la place accordée au regard et au jugement de l'autre (Messick, 1976; Witkin & Goodenough, 1981). La deuxième est une association positive entre stress ressenti et cybermalaises dans la modalité réalité virtuelle. Cet effet est difficile à expliquer, aussi deux tentatives sont proposées ici. La première est une médiation de la dépendance au champ, susceptible d'impacter à la fois le stress ressenti et les cybermalaises. Cependant, cette hypothèse est peu probable car l'association entre cybermalaises et stress est plus forte que l'association entre dépendance au champ et stress. La deuxième explication est donc plus parcimonieuse et correspond au fait de considérer qu'il s'agit d'une mésattribution des symptômes de stress et / ou de cybermalaises. En effet, les deux phénomènes induisant des symptômes relativement similaires (conscience de l'estomac, nausées, sudation), il peut être argué que ces symptômes sont confondus et donc associés, les participants étant plus familiers avec les symptômes de stress que de cybermalaises. Si cette explication ne permet pas d'induire de conséquences à la relation entre stress et cybermalaises, elle met en valeur l'effet premier qui est que les participants de la modalité papier-crayon se sont dits davantage stressés que ceux de la modalité réalité virtuelle : malgré le fait que ces derniers aient pu interpréter des symptômes de cybermalaises comme des symptômes de stress, ils en ont tout de même rapporté significativement moins. Cependant, l'inverse est également possible : il est en effet possible d'arguer que les participants du groupe réalité virtuelle ont mésattribué leurs symptômes de stress comme des symptômes de cybermalaises, possibilité que n'avaient pas les participants de la modalité traditionnelle.

5.1.5. Limites et perspectives

Au-delà de la taille de l'échantillon, acceptable pour les comparaisons entre les modalités mais relativement peu élevée pour des analyses en détail des facteurs humains au sein de la modalité virtuelle (cf. les tailles d'effets relativement faibles), il convient de noter certaines limites à l'étude Neuroprésence. Tout d'abord, depuis la récolte des données, deux articles sont parus permettant de relativiser certains aspects. La première est celle de Drażkowski et al. (2017) qui soutiennent que les différences entre les genres sur la dépendance à l'égard du champ n'existe pas réellement et qu'il s'agit d'un effet de la menace du stéréotype (Spencer et al., 1999). En effet, dans leur étude, des taux de dépendance au champ supérieurs chez les femmes n'étaient retrouvés au Test des Figures Entremêlées – test évaluant la dépendance au champ – que lorsque l'expérimentateur était un homme et le genre du participant rendu saillant, ce qui était le cas lors de la passation de Neuroprésence. Il est donc tout à fait possible que cet effet de menace du stéréotype ait pu jouer un rôle parasite sur les résultats, tout comme d'autres menaces, par exemple celle de la moindre compétence des femmes avec les ordinateurs ou les jeux vidéo (Koch et al., 2008). La deuxième étude est celle de Stanney et al. (2020) qui ont montré une absence de différences entre les genres sur les taux de cybermalaises. Selon eux, la différence retrouvée dans la littérature (Shafer et al., 2017) comme dans notre étude montrant une plus grande susceptibilité des sujets féminins serait due à la distance interpupillaire plus petite des femmes qui n'est généralement pas contrôlée dans les études utilisant des casques de réalité virtuelle. C'était également le cas dans Neuroprésence ; la distance interpupillaire était constante selon le paramétrage initial, adaptée – selon les fabricants – à la plupart des utilisateurs. Il est donc possible, si ce paramétrage initial est en fait uniquement adapté à la taille de tête des hommes, qu'il induise davantage de cybermalaises parmi les femmes.

Les autres limites de cette étude sont inhérentes aux outils utilisés et ne peuvent donc être considérées comme telles : par exemple l'utilisation massive de questionnaires ou de questions plus ou moins fermées laissant la place à de nombreux biais classiques comme la désirabilité sociale. Deux autres points similaires doivent cependant être soulevés ; le premier est l'effet du genre sur les jeux vidéo, permettant une certaine confusion et médiation des différentes variables. En effet, et bien que ceci soit en train de changer car les femmes pratiquent de plus en plus les jeux vidéo (Entertainment software association, 2019), les hommes jouent encore significativement plus que ces dernières. Il peut donc parfois sembler risqué d'imputer directement un effet des jeux vidéo sur d'autres variables (par exemple sur les cybermalaises) alors qu'il pourrait s'agir d'un effet confondu du genre, et vice-versa. Les régressions linéaires et analyses de covariance permettent

cependant de démêler ces effets et semblent distinguer des effets indépendants des jeux vidéo, par exemple sur la présence et les cybermalaises, plutôt que le genre. Le deuxième point est qu'il est toujours compliqué d'inférer des causalités et des directions aux associations retrouvées dans l'étude : s'il semble possible de considérer que la pratique des jeux vidéo entraîne une indépendance à l'égard du champ ou une réduction des cybermalaises, il est tout à fait possible que le problème doive être pris dans l'autre sens, par exemple en considérant que les participants sensibles aux cybermalaises et très dépendants à l'égard du champ ne sont pas attirés par les jeux vidéo en premier lieu. En outre, il est possible de considérer cette étude comme relativement peu écologique et la tâche peu intégrée à l'environnement : le test, bien que réalisé dans l'environnement virtuel, demeure relativement abstrait. Quoiqu'il en soit, il convient de mettre l'accent sur deux nécessités pour un déploiement à grande échelle des tests neuropsychologiques en réalité virtuelle : i) il est nécessaire de créer de nouveaux modèles de données normalisées concernant la standardisation des scores, et ii) il est nécessaire de passer à des essais cliniques sur des personnes présentant des déficits des fonctions évaluées.

5.1.6. Conclusion de l'étude

Cette étude expérimentale, si elle ne permet pas de trancher fondamentalement la question de la relation entre la présence et la performance, permet de nombreux avancements des connaissances dans le domaine. Deux résultats principaux doivent être synthétisés. Le premier est que lors d'un test neuropsychologique classique, les hommes de la modalité réalité virtuelle semblent présenter une performance supérieure aux femmes, mais également une performance supérieure aux hommes réalisant ce même test au format papier-crayon. Le second résultat majeur de cette expérimentation est l'étude des facteurs humains en réalité virtuelle : les variables étudiées semblent largement s'entremêler autour de la dépendance au champ pour distinguer un profil cognitif (plus de pratique des jeux vidéo, moins de dépendance au champ) et une expérience utilisateur (plus de sentiment de présence, moins de cybermalaises). Ce profil cognitif va induire une expérience utilisateur favorisant – via une meilleure allocation des ressources attentionnelles – la performance en réalité virtuelle et pour laquelle les hommes présentent des scores globalement plus élevés. Il est également intéressant de soulever certaines associations inédites, notamment les corrélations négatives entre présence et dépendance au champ ou entre dépendance au champ et jeux vidéo. Ces deux dernières, par ailleurs, interagissent pour prédire significativement le taux de présence. Enfin, le fait que la réalisation d'un test en réalité virtuelle semble réduire le stress de laboratoire n'est pas un résultat à négliger.

Ces résultats proposent des avancées méthodologiques et fondamentales importantes. Tout d'abord, ils permettent de révéler que l'implémentation de tests neuropsychologiques en réalité virtuelle n'est pas une simple transposition numérique de la réalité physique, mais bien un nouveau paradigme qu'il convient d'explorer pour pouvoir le contrôler. Il est par exemple généralement considéré que les femmes sont légèrement plus performantes que les hommes au Wisconsin Card Sorting Test (K. B. Boone et al., 1993), ce qui semble largement inversé en réalité virtuelle. Il est donc nécessaire de répéter la nécessité de créer de nouvelles bases de données permettant une standardisation des tests réalisés en réalité virtuelle, et une comparaison des performances du participant par rapport aux normes de la population. De plus, la place du genre dans le modèle présenté précédemment doit être approfondie ; il est fortement possible que le genre ne soit qu'un facteur confondant des autres variables, les femmes pratiquant par exemple moins les jeux vidéo et étant plus dépendantes à l'égard du champ, ou encore un effet de menace du stéréotype, tout comme il est possible que des différences biologiques entre les deux sexes provoquent ces effets. Il est également nécessaire d'envisager que d'autres variables, non prises en compte ici, doivent l'être pour affiner le modèle, et que ces facteurs ne soient que des manifestations d'un profil favorable à la réalité virtuelle. Enfin, il convient de noter que cette expérimentation, dans sa modalité réalité virtuelle, était réalisée lors d'une tâche cognitive très précise comportant peu d'interaction et de navigation au sein de l'environnement, et que les relations entre les différentes variables doivent être comprises dans leur contexte ; il y a fort à parier qu'un type de performance différent entraînerait des effets différents, par exemple selon le niveau d'intégration de la tâche dans l'environnement virtuel ou encore de la propension de l'environnement à générer des cinétoses (cybermalaises). La nature de la tâche est donc une variable d'importance fondamentale qu'il convient de prendre en compte lorsque l'on veut analyser les facteurs humains impactant la performance en réalité virtuelle.

5.2. Spatioprésence : étude sur la cognition spatiale

5.2.1. Présence, facteurs humains et cognition spatiale

L'objectif principal de cette étude était de déterminer si le sentiment de présence affecte l'exécution des tâches lors d'une évaluation de la cognition spatiale en réalité virtuelle. Les résultats empiriques confirment notre hypothèse : le sentiment de présence semble favoriser les performances de la cognition spatiale, probablement en raison de niveaux de présence élevés ainsi que d'une allocation conjointe et mutuellement nourrissante des ressources attentionnelles (Draper et al., 1998). Ce résultat est un grand pas en avant pour la compréhension globale du cadre de la réalité virtuelle. Néanmoins, deux questions majeures doivent être discutées. La première consiste à étudier l'impact des facteurs humains annexes sur cette relation, et la deuxième à étudier la nature de la relation entre présence et performance. En effet, il est souvent suggéré lors des discussions sur cette relation qu'il existe une médiation ou modération d'autres variables parmi lesquelles la pratique des jeux vidéo, les cybermalaises, le sexe et la dépendance au champ. Au vu des données expérimentales, il est possible de répondre que dans l'étude actuelle et sur une tâche de cognition spatiale, ces médiations et modérations sur la performance n'étaient pas directement significatives. Cependant, il ne serait pas parcimonieux d'affirmer que ces facteurs humains n'affectent pas du tout les résultats aux évaluations : premièrement, les cybermalaises expliquent une part importante de la performance de cognition spatiale aux côtés du sentiment de présence. Ce modèle, qui explique plus de 25% de la variance dans la performance de cognition spatiale, révèle des différences d'impact des symptômes négatifs entre les hommes et les femmes (le genre n'ayant pas d'effet direct sur la performance). En effet, lorsqu'étudiée indépendamment, la performance est fortement et négativement corrélée aux cybermalaises chez les femmes, alors que ce n'est pas le cas chez les hommes. Cet effet, qui peut être visuellement exploré dans les diagrammes de dispersion (Figure 18), n'est pas surprenant : les symptômes négatifs n'ont un impact négatif sur la performance que lorsqu'ils existent ou dépassent un certain seuil, ce qui est plus souvent le cas chez les femmes que chez les hommes (Munafo et al., 2017; Shafer et al., 2017; Weech et al., 2019). Cet effet pourrait s'expliquer par le fait que la distance interpupillaire n'était pas contrôlée comme le recommandent Stanney et al. (2020) ou par d'autres facteurs non mesurés dans cette étude et présentés en introduction. Ce résultat révèle que l'interaction entre cybermalaises et genre est une question de seuil, et non de modalités entre hommes et femmes. Quant aux effets négatifs des cinétoses sur la cognition, ces derniers sont relativement bien connus (Gresty et al., 2008; Gresty & Golding, 2009; Matsangas et al., 2014; Nalivaiko et al., 2015),

et pourraient être attribués à des perturbations des ressources attentionnelles, par exemple produites par un recalibrage destiné à retrouver une stabilité posturale impactée par la désorientation, ou encore à l'émergence d'une conscience du corps ou du stress.

Un autre résultat important de cette étude révélant l'impact des facteurs humains en réalité virtuelle est le fait que la pratique des jeux vidéo prédit de manière significative à la fois le sentiment de présence et les cybermalaises, qui sont tous deux des prédicteurs de la performance de cognition spatiale. Ces résultats sont, pour la plupart, suggérés indépendamment par différents auteurs, notamment ceux de l'étude précédente Neuroprésence ou de Gamito et al. (2008). Cependant, l'orientation de cette association entre jeux vidéo et sentiment de présence demeure mystérieuse : les jeux vidéo sont-ils plus attrayants pour les individus plus sensibles à la présence, ou les jeux vidéo entraînent-ils les joueurs à être plus sensibles à la présence, par exemple en renforçant leur familiarité avec l'interaction informatique ? Cette familiarité pourrait rendre les joueurs de jeux vidéo plus à l'aise en réalité virtuelle, par exemple en facilitant la reconnaissance de schémas cognitifs ou de processus ergonomiques, ce qui entraînerait une plus grande présence notamment en diminuant le besoin d'attention sur l'interface. Selon le point de vue de l'approche écologique, la familiarité avec les jeux vidéo pourrait rendre les affordances de la réalité virtuelle plus saillantes. Cette interprétation expliquerait pourquoi cette relation entre sentiment de présence et pratique des jeux vidéo ne se retrouve pas systématiquement dans la littérature (Alsina-Jurnet & Gutiérrez-Maldonado, 2010; Weech, Kenny, et al., 2020) : lorsque l'interaction homme-machine ou les processus du jeu sont trop différents de ce à quoi les joueurs sont habitués, le transfert de compétences ne peut pas se produire et n'affecte donc pas le sentiment de présence. Il est aussi possible que la fréquence de pratique des jeux vidéo seule ne soit pas assez sensible, et que la prise en compte du type de jeux vidéo pratiqués soit fondamentale : ceci expliquerait également pourquoi la variable « pratique des jeux vidéo », uniquement basée sur cette fréquence, était moins informative dans Neuroprésence. Une autre interprétation, bien que compatible avec les discussions précédentes, serait que les jeux vidéo, et notamment les jeux vidéo de types intensifs, entraînent les joueurs à être plus concentrés sur une tâche virtuelle et à mieux inhiber les stimuli non pertinents, ce qui est fondamental pour l'émergence du sentiment de présence. En effet, non seulement il est nécessaire d'inhiber les stimuli non pertinents du monde réel pour construire un sentiment de présence, mais ces compétences pourraient également aider à inhiber les symptômes négatifs, réduisant ainsi la manifestation des cybermalaises. Pour cette raison, le fait que les cybermalaises soient significativement et négativement corrélés au sentiment de présence n'est pas surprenant et constitue une association courante dans la littérature

(Weech et al., 2019), même s'il est difficile de dire si le sentiment de présence réduit les cybermalaises tout comme il réduit la douleur (Hoffman, Patterson, et al., 2004), ou si les cybermalaises réduisent le sentiment de présence en attirant l'allocation de ressources attentionnelles vers le corps physique du participant. De même, l'association entre pratique des jeux vidéo et cybermalaises a déjà été suggérée et trouvée (De Leo et al., 2014; Knight & Arns, 2006; Weech, Kenny, et al., 2020) : les interprétations de cet effet pourraient être soit que les jeux vidéo sont plus attrayants pour les personnes moins sensibles aux cybermalaises, soit que les jeux vidéo entraînent les joueurs à être moins sensibles aux symptômes négatifs car réduits par habitude (Gavgani et al., 2017; Hildebrandt et al., 2018). Il est en effet possible que l'habitude au conflit perceptif pendant la pratique du jeu vidéo entraîne le joueur à éprouver moins de cybermalaises en réalité virtuelle, ce qui in fine favorise le sentiment de présence. Il faut noter que l'association négative entre sentiment de présence et cybermalaises n'est, dans notre étude, que de nature corrélative significative. Il est possible que la technique de locomotion et la qualité de l'expérience de réalité virtuelle n'aient pas déclenché suffisamment de symptômes négatifs, comme le montrent les faibles scores de cybermalaises, réduisant ainsi la force de l'impact sur le sentiment de présence en dessous du seuil de signification.

Parmi les variables souvent suggérées ou considérées comme ayant un impact sur la présence et la performance en réalité virtuelle, deux d'entre elles n'étaient pas significatives dans cette étude. La première est la dépendance au champ, qui, si elle tenait un rôle central dans Neuroprésence en étant prédictif significatif des cybermalaises et de la présence, s'est révélée n'être corrélée à aucune autre variable dans Spatioprésence. Une interprétation possible de l'absence de corrélation significative entre les cybermalaises et la dépendance au champ dans notre étude est l'absence de flux visuel, les participants se déplaçant par petites téléportations et non par mouvement linéaire. Or, il est possible d'arguer que l'expérience d'un flux visuel en réalité virtuelle, alors que le participant est statique (comme dans Neuroprésence), augmente de manière significative l'impact des informations visuelles (incohérentes) sur l'intégration sensorielle, ce qui déclenche des différences entre les deux pôles du continuum de dépendance au champ. Contrairement à Neuroprésence, l'environnement virtuel de Spatioprésence était relativement pauvre en stimulation du flux visuel et en incohérences, ce qui pourrait expliquer l'absence d'impact de la dépendance au champ visuel. Cependant, cette explication n'est pas cohérente avec le résultat de Hecht & Reiner (2007) qui ont trouvé une association négative entre sentiment de présence d'objets et dépendance au champ dans un environnement, association qui n'est pas présente dans notre étude. Il est possible de soutenir que l'association trouvée dans leur étude est un effet

de médiation de la relation entre cybermalaises et dépendance au champ, même s'il est peu probable qu'un dispositif haptique présentant des objets virtuels puisse déclencher des symptômes négatifs suffisamment forts. D'autres études sont nécessaires pour étudier l'effet de la dépendance au champ en réalité virtuelle, notamment sur le sentiment de présence. Des explorations plus approfondies sur cette question pourraient également apporter des informations supplémentaires sur la relation entre sentiment de présence et cybermalaises.

La deuxième variable non significative ou peu informative est le genre, bien que, encore une fois, le genre était le seul prédicteur significatif de la performance virtuelle au Wisconsin Card Sorting Test dans Neuroprésence. Il est possible d'arguer i) que le genre était également peu informatif dans Neuroprésence (notamment au vu des tailles d'effet) car le type de jeux vidéo pratiqués n'était pas mesuré avec précision, et qu'il s'agit ainsi d'un effet de médiation non mesuré, et ii) que le genre était plus informatif dans Neuroprésence à cause du flux visuel et donc des activations de différences sur la sensibilité aux cinétoses et de dépendance au champ. Quoiqu'il en soit, et contrairement à la connaissance heuristique et à une partie de la littérature sur la cognition spatiale (Brake & Lacasse, 2018; S. C. Levine et al., 2016; Moffat et al., 1998; Parsons et al., 2004; Silverman & Eals, 1992), les performances de cognition spatiale n'étaient pas significativement inférieures chez les femmes dans cette étude. Ce résultat n'est pas révolutionnaire dans le domaine, car la performance est un terme vague qui englobe différents aspects de la cognition spatiale. En effet, il est généralement constaté que les hommes sont meilleurs pour les tâches d'enquête (Coluccia & Louse, 2004), pour les tâches incorporant des directions cardinales (Saucier et al., 2002), ou évaluant l'efficacité de la navigation (Grön et al., 2000). Cependant, Boone et al. (2018) note qu'il n'existe :

no systematic sex differences in tasks that can be accomplished with route and landmark knowledge, such as when learning from a map, retracing a learned route, or remembering landmarks along a route

ce qui est corroboré par d'autres études (Coluccia & Louse, 2004; Montello et al., 1999; Saucier et al., 2002) et correspond à la cognition spatiale évaluée dans cette expérimentation, expliquant l'absence d'effet du genre. Outre la cognition spatiale, les hommes et les femmes ne diffèrent pas non plus dans cette étude sur leurs taux de présence, alors même que les femmes sont parfois considérées dans la littérature comme moins sensibles au sentiment de présence que les hommes (Felnhofer et al., 2012). De façon similaire, il n'existe pas de différences significatives entre les genres en ce qui concerne la fréquence de pratique de jeux vidéo, même si les hommes jouent davantage aux jeux dits intensifs que les femmes. Cette différence dans le type de jeux vidéo pratiqués, combinée à la régression significative montrant que la pratique de jeu vidéo prédit

les cybermalaises, semblent confirmer l'hypothèse de l'habituation au conflit sensoriel, largement plus présent dans les jeux intensifs. Au vu de l'association négative entre cybermalaises et performance, le fait que les femmes éprouvent davantage de symptômes négatifs que les hommes devrait être une préoccupation majeure. Cependant, cette affirmation peut être mise en perspective : le fait que la pratique des jeux vidéo soit un meilleur prédicteur des cybermalaises que le genre montre que cet effet pourrait être un artefact culturel, très probablement expliqué par des différences dans les activités quotidiennes ou de développement, et donc susceptible de changer. Il est alors possible d'affirmer que dans cette étude, le genre a peu d'effet en soi, à l'exception de différences dans la pratique du jeu, pratique correspondant à une tendance culturelle potentiellement changeante (Entertainment software association, 2019). L'absence d'un effet indépendant du genre, même s'il va à l'encontre des hypothèses expérimentales, est une bonne chose car cela signifie que cette variable n'est pas un biais inhérent à la réalité virtuelle. Ceci fait écho aux données et interprétations de Neuroprésence, pour lesquelles et malgré un effet prédictif faible du genre sur la performance au Wisconsin Card Sorting Test, il est possible d'arguer que cette performance est due à un ensemble de dimensions plus informatives sur lesquelles les hommes, en moyenne, présentent des scores plus élevés. Pour conclure avec l'effet du genre, cette étude souligne que la pratique des jeux vidéo, les cybermalaises et le sentiment de présence doivent être systématiquement contrôlés pour des évaluations rigoureuses en réalité virtuelle. Considérant cela, il est possible de proposer une réponse à la question *Is virtual reality for men only? Exploring gender differences in the sense of presence* (Felnhofer et al., 2012) : non elle ne l'est pas, mais elle favorise tout de même certaines personnes plus que d'autres.

5.2.2. La nature de la relation présence – performance

Il est souvent avancé dans la littérature sur la réalité virtuelle qu'une direction causale ne peut pas être déterminée entre sentiment de présence et performance, puisque les deux se nourrissent mutuellement (Nash et al., 2000; Welch, 1999). Reprenons, comme exercice de pensée, l'environnement fictif virtuel où l'on demande à des participants d'attraper des balles virtuelles qui leur sont lancées. Dans cette tâche sensorimotrice très intégrée, attraper les balles signifie une amélioration de la performance à la tâche, mais aussi la réalisation d'interactions sensorimotrices continues qui, à leur tour, renforcent le sentiment de présence. Dans ce contexte, il est pertinent de se demander si la présence favorise la performance, ou si la performance favorise la présence (Nash et al., 2000). En effet, les interactions avec l'environnement sont souvent considérées comme essentielles à l'émergence de la présence spatiale. Certains auteurs ont même affirmé que le phénomène est une construction bidimensionnelle basée sur l'interaction entre le sentiment

d'être situé quelque part et la capacité d'interagir avec ce quelque part (Wirth et al., 2007). Or, dans Spatioprésence, l'imbrication entre la performance et les interactions sensorimotrices n'est pas aussi simple : les participants n'ont pas de retour (ni continu ni ponctuel) sur leur performance, et ils ne connaissent pas les modalités exactes de l'évaluation avant la toute fin de l'expérimentation. Un point intéressant concernant cette évaluation est que la cognition spatiale est mesurée directement via le casque de réalité virtuelle, à l'intérieur de l'environnement virtuel, ce qui a pu aider les sujets plus présents à se souvenir en ne quittant pas tout à fait le lieu d'apprentissage : on sait en effet que les capacités de rappel sont améliorées lorsque le contexte de rappel est similaire au contexte d'apprentissage (Smith & Vela, 2001). Schwind et al. (2019) recommandent, pour des raisons similaires, d'utiliser les questionnaires de présence directement en réalité virtuelle pour une évaluation plus précise, comme nous l'avons fait avec les performances de la cognition spatiale.

Dans tous les cas, il reste possible de soutenir que, dans une certaine mesure, le fait de se sentir efficace pendant la navigation virtuelle a déclenché une plus grande implication émotionnelle et donc un taux de présence plus élevé. Cependant, il semble également – voire plus – fidèle au principe de parcimonie d'arguer que se sentir présent dans l'environnement virtuel ait en premier lieu favorisé l'élaboration de cartes cognitives et l'encodage de repères visuels qui ont plus tard favorisé le rappel des informations spatiales de l'évaluation (R. A. Epstein et al., 2017; Madl et al., 2015). La question au cœur du raisonnement est ici l'aspect procédural : quand la présence se produit-elle ? Dans leur modèle de formation de la présence spatiale, Wirth et al. (2007) soutiennent qu'une modélisation antérieure de la situation spatiale est nécessaire à l'émergence de la présence spatiale, et que ce modèle de la situation est largement basé sur des indices environnementaux spatiaux. Leur modèle est donc procédural ; la représentation de l'environnement en constitue le premier niveau, et la formation de la présence spatiale le deuxième. De manière cohérente, il serait possible d'avancer que certains participants ont alloué plus de ressources attentionnelles à l'environnement et à ses indices perceptifs, améliorant d'abord leur représentation spatiale puis leur sentiment de présence. Dans ce cadre, il est difficile pour la présence de favoriser la cognition spatiale, puisqu'elle précède son émergence. Au mieux, les deux concepts partagent une base commune de premier niveau. Le seul argument possible dans ce cadre pour que la présence favorise la performance de cognition spatiale est qu'un taux de présence plus élevé améliore le rappel contextuel et / ou émotionnel de la cognition spatiale et des représentations qui la sous-tendent (A. Y. Lee & Sternthal, 1999; Nadler et al., 2010; Smith & Vela, 2001), mais pas son traitement en tant que tel.

Ainsi, si nous considérons la présence comme un phénomène de second niveau résultant du traitement perceptif, cognitif et moteur dans l'environnement virtuel, alors elle n'affecte pas et ne peut pas affecter les performances de cognition spatiale au-delà des aspects motivationnels et émotionnels associés à l'apprentissage. Cette perception de la relation présence – performance mérite alors d'être discutée au sein des théories écologiques de la perception. Comme décrit en détail en introduction, les théories écologiques de la cognition considèrent la cognition comme émergeant d'une interaction continue entre un organisme agissant et son environnement (Lobo et al., 2018; Rowlands, 2010; Thompson, 2007). Appliquée au sentiment de présence, cette considération fait de cette dernière une partie fondamentale de la conscience issue de l'interaction sujet-objet (Coelho et al., 2009; Mantovani & Riva, 1999; Giuseppe Riva & Waterworth, 2003; Zahorik & Jenison, 1998). Dans ce cas, il n'existe pas de modélisation de premier niveau basée sur la représentation de l'environnement, seulement une perception-cognition de l'être-au-monde dont la présence est une composante, aux côtés d'autres comme le sentiment d'incarnation ou d'agentivité (Braun et al., 2018; Kilteni et al., 2012; J. W. Moore, 2016). La présence, en tant que phénomène dans un monde virtuel ou physique, résulterait de l'interaction avec l'environnement et de la perception des affordances qu'il contient (Grabarczyk & Pokropski, 2016). C'est sur la base de ces affordances que les individus construisent à la fois leur perception et leur sentiment de présence. Il ne peut donc y avoir de cognition spatiale sans un sentiment primordial de présence. En effet, dans ces vues, puisque le sentiment de présence émerge du noyau de l'expérience, il ne suit pas la cognition spatiale mais, dans une certaine mesure, l'induit. Par exemple, l'évaluation spatiale de la reconnaissance d'un lieu, comme réalisée dans Spatioprésence, serait définie par les théories classiques comme le rappel de la représentation spatiale (qui pourrait être amélioré a posteriori par le sentiment de présence), alors qu'elle serait considérée comme le rappel de l'expérience d'interaction locale avec l'environnement, expérience composée constitutivement par le sentiment de présence. Tout comme la relation entre les systèmes perceptifs, cognitifs et moteurs est constitutive et non causale dans les théories écologiques (Adams, 2010; Mahon, 2015; Sullivan, 2018), la relation entre sentiment de présence et performance spatiale pourrait l'être également.

Avant de conclure avec ces discussions théoriques autour de la relation présence – performance, il est important de noter que les données expérimentales ne nous permettent pas de répondre à cette question ou de choisir un cadre théorique plutôt qu'un autre. En effet, et au-delà de la taille de l'échantillon relativement restreinte, des protocoles plus spécifiquement développés sont nécessaires pour répondre à cette question. Nous ne pouvons donc qu'espérer que cette discussion, légèrement abstraite puisque relativement à part des résultats empiriques, stimulera et aidera les

futures recherches sur cette question fondamentale. A présent, poursuivons l'exercice de pensée du jeu fictif de capture de balles en réalité virtuelle décrit précédemment. Dans les conceptions classiques, les individus vont, lorsque confrontés au jeu de capture de balle, construire un sentiment de présence sur la base d'une représentation spatiale de l'environnement dans lequel ils sont immergés. Ensuite, ces individus vont continuellement tester leur sentiment de présence (Wirth et al., 2007), par exemple en confrontant la trajectoire des balles avec une trajectoire attendue et internalisée. Dans ce cadre, l'acte d'attraper une balle constitue non seulement l'exécution d'une tâche donc l'augmentation de la performance, mais aussi une augmentation du sentiment de présence. En effet, attraper la balle permet d'ajouter aux représentations et aux hypothèses perceptives une modalité sensorielle supplémentaire (haptique), mais permet également d'améliorer l'implication du participant dans le jeu grâce à l'auto-évaluation de la performance. Cette augmentation seconde du sentiment de présence pourra elle aussi améliorer la performance à la tâche, par exemple en produisant une inhibition des cybermalaises ou encore en améliorant le rappel contextuel et émotionnel si l'on demande au participant, a posteriori, combien de balles il pense avoir attrapées. Ce fonctionnement est constitutivement procédural, composé de boucles de rétroactions sensorimotrices. Dans la vision écologique, toute cette expérience est constitutive ; tant le sentiment de présence que la performance émergent de la capacité à interagir avec l'environnement et seront, en cas de balles présentant des trajectoires incohérentes, altérés par sa mauvaise qualité. Dans ces conceptions théoriques, avant de pouvoir exécuter une tâche, il est primordial de percevoir la capacité d'interagir avec l'objet de la performance et, ce faisant, de se sentir présent dans l'environnement. Même pendant la performance, que ce soit durant les phases inconscientes de planification et d'exécution sensorimotrice ou pendant la réception d'un retour haptique indiquant le succès, la présence et la performance sont intimement liées car elles sont le résultat d'une interaction continue de l'individu avec l'environnement. Ainsi, dans un cadre écologique, la question de la direction de la causalité entre la performance et la présence est, dans une certaine mesure, sans objet. Elles sont, tout comme l'histoire des aveugles décrivant diverses parties d'un même éléphant de manières très différentes, la même chose observée sous différents angles.

5.2.3. Limites et perspectives

La principale limite de l'étude Spatioprésence est la taille relativement restreinte de l'échantillon. Si celui-ci est suffisamment conséquent pour discuter les corrélations mises en évidence, notamment lorsqu'elles vont dans le sens des hypothèses théoriques et expérimentales a priori, l'échantillon de l'étude peut sembler un peu limité pour des analyses de régressions linéaires, bien que

les tailles d'effet soient relativement acceptables. Un échantillon plus large pourrait non seulement confirmer les effets trouvés dans cette étude avec une puissance statistique plus élevée, mais aussi permettre l'exploration d'un plus grand nombre d'effets interactionnels. En effet, parmi toutes les interprétations suggérées précédemment, il est probablement vain de chercher une seule explication. Il est beaucoup plus probable que toutes ces variables contribuent de manière différente et mutuelle à former un profil favorable à la réalité virtuelle, conduisant à une meilleure expérience utilisateur améliorant les performances. De plus, un échantillon de femmes présentant des niveaux de pratique des jeux vidéo similaires à ceux des hommes (que ce soit en termes de fréquence ou de genre) pourraient s'avérer intéressants pour démêler certains effets entre pratique des jeux vidéo, présence et cybermalaises. Les autres limites, notamment l'utilisation massive de questionnaires et l'impossibilité d'inférer des causalités statistiques, sont communes et déjà discutées dans la partie Neuroprésence. En outre, des études supplémentaires sur la relation entre les ressources attentionnelles et la présence sont obligatoires puisque la présente étude n'a pas évalué cette question cruciale. Enfin, la reproduction de ce genre d'études avec des formes de performance différentes ou sur des populations pathologiques est nécessaire pour permettre le déploiement à grande échelle des implémentations virtuelles des tests neuropsychologiques dans le but de partager les bénéfices de cette technologie aussi largement que possible.

5.2.4. Conclusion de l'étude

Le principal résultat de cette étude est le modèle, constitué par le sentiment de présence et les cybermalaises qui explique plus de 25% de la variance de performance de cognition spatiale en en réalité virtuelle. Cette association entre sentiment de présence, cybermalaises et performance est un grand pas pour la compréhension globale du cadre de la réalité virtuelle, à la fois théoriquement et méthodologiquement. Ce modèle est discuté comme une allocation conjointe et mutuellement nourrissante de ressources attentionnelles. Un résultat secondaire mais tout aussi important, est le fait que la pratique des jeux vidéo constitue un prédicteur significatif du sentiment de présence. Ce résultat est discuté comme un entraînement de la pratique des jeux vidéo, favorisant non seulement une familiarité accrue avec l'interaction, mais aussi une meilleure reconnaissance de schémas cognitifs ou encore une meilleure inhibition de stimuli non pertinents. Cet effet induit par la pratique des jeux vidéo permet ainsi, in fine, une meilleure et plus grande allocation de ressources attentionnelles vers l'environnement lui-même. L'entraînement des jeux vidéo, notamment son effet sur l'habituation au conflit sensoriel, est également discuté comme une explication de la raison pour laquelle les cybermalaises sont prédits de manière significative par la pratique des jeux vidéo, plutôt que par le genre. L'interaction entre genre et cybermalaises sur la

performance est discutée comme un artefact de la culture du jeu masculin, relativisant ainsi son impact dans les équations de la réalité virtuelle. Même si la causalité présence – performance est toujours discutable selon la nature du sens de la présence et le cadre théorique utilisé, la force de l'association entre ces deux phénomènes doit être prise en compte par les acteurs et les chercheurs de la réalité virtuelle. De plus, nous défendons dans cette étude que la confrontation des vues représentatives traditionnelles et des vues écologiques de la cognition conduit à une contribution bénéfique au domaine de la présence et plus largement aux théories et aux applications de la réalité virtuelle.

Cependant, le sentiment de présence, la pratique des jeux vidéo et les cybermalaises ne doivent probablement pas être considérés comme les trois seules dimensions du profil cognitif favorable de la réalité virtuelle, mais plutôt comme des manifestations mesurables de celui-ci. De nombreuses autres variables doivent en effet être étudiées dans le cadre d'études futures. Par exemple, si la dépendance au champ n'a aucun effet dans cette étude, ceci pourrait se révéler différent dans un environnement visuellement stimulant et perturbant. En effet, il faut noter que l'impact de ce profil cognitif, tout comme l'association entre présence et performance, dépendent très probablement de la nature de la tâche. De façon similaire à ce que Draper et al. (1998) ont suggéré, l'économie de ressources attentionnelles entre performance et présence pourrait dépendre du degré d'intégration de la tâche dans l'environnement virtuel. Ceci pourrait expliquer pourquoi le niveau de significativité que nous avons trouvé sur une évaluation de la cognition spatiale, une tâche partageant de nombreux processus avec la présence spatiale, n'est pas reproduit de façon systématique dans la littérature, ni dans Neuroprésence. Compte tenu des nombreuses utilisations et formes différentes que peuvent prendre les performances humaines, la reproduction de ce type d'analyse avec une tâche différente (ou la comparaison de tâches neuropsychologiques virtuelles et réelles) devrait être utile pour le cadre global de la réalité virtuelle, et notamment ses applications dans la recherche et la santé. En effet, le contrôle de ce profil favorable à l'immersion pourrait finir par devenir obligatoire lors de l'utilisation de la réalité virtuelle à des fins d'évaluation de la performance humaine pour des expérimentations méthodologiquement rigoureuses.

5.3. Nav(i)r : étude sur l'évolution de la dépendance au champ

5.3.1. Sentiment de présence

5.3.1.1. Présence et présence historique

La relativement bonne cohérence interne entre les sous-items de la présence spatiale et ce nouveau sous-item qu'est la présence historique, associée à la forte corrélation avec cette dernière permet de souligner la pertinence de cette nouvelle dimension. Il est cependant important de noter et discuter certains points. Tout d'abord, et de façon évidente, cette dimension historique ne peut s'appliquer qu'à des environnements présentant une période historique particulière. De façon tout aussi évidente, cette présence historique ne mesure nullement la fidélité historiographique de l'environnement virtuel proposé, mais bien sa capacité à produire une sensation de transport dans le temps. A cette fin, il pourrait être intéressant d'évaluer la présence historique dans des environnements virtuels afin d'analyser les attentes et représentations que se font les participants d'époques historiques particulières. De façon similaire, la présence historique pourrait permettre d'évaluer si l'immersion historique permet, par son côté atypique ou fictionnel, d'engendrer un sentiment de présence supérieur à celui d'une immersion à l'époque actuelle. Il est à ce titre intéressant de voir que c'est avec la sous-échelle « Réalisme » du Questionnaire sur l'Etat de Présence que la présence historique est la plus associée. Enfin, et considérant que les analyses sur l'évolution de la dépendance au champ présentent de plus grandes capacités discriminatoires lorsque la présence historique est ajoutée à la présence spatiale, il peut être pertinent d'ajouter systématiquement cette dimension lors de l'utilisation d'environnements virtuels historiques, comme ce sera le cas dans ce travail.

5.3.1.2. Présence et dimensions de présence

Les corrélations entre les différentes dimensions du sentiment de présence et les autres variables de l'étude sont particulièrement intéressantes. Le fait que la dépendance au champ et l'évolution de cette dépendance ne soit significativement corrélée qu'à l'échelle Réalisme du Questionnaire sur l'Etat de Présence souligne le rôle de cette dernière dans l'intégration visuelle des éléments virtuels. Au contraire, la corrélation négative forte entre Possibilité d'agir ou Qualité d'interface (et même Possibilité d'examiner et Auto-évaluation de la performance) et cybermalaises, ainsi que l'absence d'association avec l'échelle Réalisme souligne que les symptômes négatifs prennent racine dans l'interaction avec l'environnement. C'est d'ailleurs cette interaction qui est facilitée par

les individus présentant une bonne expérience des jeux vidéo, puisque ces mêmes corrélations sont retrouvées avec l'expérience vidéoludique, à nouveau sans impact sur l'échelle Réalisme.

5.3.2. Mesure de la pratique des jeux vidéo

S'il est toujours délicat de comparer la cohérence d'une variable par rapport à une autre, notamment son pouvoir statistique et discriminant par rapport à d'autres variables, la prise en compte des genres de jeux vidéo pratiqués semble plus pertinente que leur simple fréquence, que ce soit théoriquement ou empiriquement. Théoriquement car, nous l'avons vu, les jeux vidéo constituent un domaine très large : jouer à Candy Crush Saga (jeux de puzzle et d'assortiment) de façon peu engageante en 10 tranches de 5 minutes par jour dans les transports communs ou en attendant une réunion engageant des processus perceptifs, moteurs et cognitifs mais aussi motivationnels largement différents d'une session compétitive de 50 minutes d'un match de Dota (jeu d'arène en ligne multijoueur). En effet, ces types de jeux intensifs, parfois appelés *hardcore games* nécessitent et entraînent des processus complexes et des niveaux d'engagement et de compétitions particulièrement forts (D. Johnson et al., 2015; Mora-Cantalops & Sicilia, 2018; Saputra et al., 2017; Silva et al., 2017; Steve, 2017), allant souvent jusqu'à engendrer des comportements toxiques (Kordyaka, 2018; Mora-Cantalops & Sicilia, 2018). Empiriquement, car la prise en compte de cette distinction entre *casual games* et *intensive games* a révélé des corrélations plus fortes avec les variables de la réalité virtuelle que lorsque la fréquence de pratique seule est considérée. Ces associations plus fortes sont retrouvées avec le sentiment de présence et avec les cybermalaises, mais également avec le genre, révélant que les différences d'expérience vidéoludique entre hommes et femmes sont plus profondes qu'une simple question de fréquence. Quoi qu'il en soit, la prise en compte du genre de jeux vidéo pratiqués autant que la fréquence devrait être systématiquement réalisée lors d'études en réalité virtuelle sur ce facteur humain, comme ce sera le cas dans ce travail.

5.3.3. Evolution de la dépendance au champ

L'objectif premier de cette étude était d'analyser de potentielles variations dans la dépendance au champ des participants, avant et après une immersion en réalité virtuelle. Les résultats empiriques montrent en effet, en accord avec nos hypothèses, une diminution globale de la dépendance au champ. L'idée d'une recalibration sensorielle et d'une évolution de la dépendance au champ comme mécanisme compensatoire destiné à réguler les symptômes de mal des transports n'est pas nouvelle (Mahboobin et al., 2005), elle a d'ailleurs déjà été retrouvée lors de stimulations visuelles optocinétiques fortes (Pavlou et al., 2011). Cette recalibration est souvent évoquée

comme associée à des ajustements posturaux (Scotto Di Cesare et al., 2015). Cependant, Nav(i)r est la première étude, à notre connaissance, montrant une différence significative d'évolution de la dépendance au champ après une immersion en réalité virtuelle simple dont les stimulations visuelles ne sont pas destinées à provoquer cette recalibration et dont la durée d'immersion moyenne est inférieure à cinq minutes. Il convient toutefois de noter que si l'échantillon dans son ensemble manifestait une diminution massive de la dépendance au champ, il existe un groupe restreint d'individus (15 personnes, approximativement 15% de l'échantillon) présentant au contraire une augmentation significative de leur dépendance au champ. Il convient donc d'entrer plus en détail dans les comparaisons des différents groupes (évol+, évol- et évol0), notamment dans le but de tester l'hypothèse théorique et expérimentale d'un mécanisme compensatoire des cybermalaises provoqués par le conflit sensoriel.

Il est particulièrement intéressant de noter que les individus diminuant leur dépendance au champ et les individus l'augmentant semblent expérimenter la réalité virtuelle de façon tout à fait différente. En effet, les individus du groupe évol+, le groupe à contre-courant présentant une augmentation de leur dépendance au champ, montrent non seulement des niveaux de dépendance au champ pré-immersion largement inférieurs, mais ils rapportent également significativement plus de présence et moins de cybermalaises. Il est intéressant de constater que cette différence de dépendance au champ pré-immersion entre les groupes n'est pas retrouvée en post-immersion, puisque les individus ayant un haut taux de dépendance au champ l'ont diminué, et ceux ayant un taux bas l'ont augmenté. Seul le groupe évol0 présente un style cognitif stable et des niveaux de dépendance au champ non statistiquement différents entre les deux mesures. Considérant à la fois la plus grande susceptibilité aux cinétoses des individus dépendants au champ, mais aussi l'association forte entre présence et cybermalaises ainsi que les différences de taux de cybermalaises rapportés entre les groupes, ces résultats empiriques semblent corroborer l'hypothèse d'un mécanisme compensatoire.

Selon cette hypothèse explicative, les individus présentant une plus grande dépendance au champ sont, lorsqu'immergés, plus sensibles au conflit sensoriel inhérent à la réalité virtuelle, notamment à cause d'une plus grande utilisation des repères visuels. Rappelons en effet qu'en réalité virtuelle, le conflit sensoriel est généralement dû à des stimulations visuelles incohérentes avec le reste de l'intégration multisensorielle, notamment proprioceptive et vestibulaire (Bos et al., 2008; LaViola, 2000; Rebenitsch & Owen, 2016b; Shafer et al., 2017). Les symptômes négatifs de cybermalaises de ces participants contribuent non seulement à diminuer leur sentiment de présence, mais surtout ils poussent le système perceptif et intégratif vers une recalibration du

traitement multisensoriel. Les informations visuelles étant identifiées comme problématiques, ce système perceptif procède à une recalibration moins dépendante de ces dernières, entraînant, lors de la mesure post immersion, une moindre dépendance à l'égard du champ. Autrement dit, les individus présentant une forte dépendance au champ visuelle doivent en réalité virtuelle allouer une certaine partie de leurs ressources attentionnelles à la recalibration et à la compensation multisensorielle – afin de tendre vers une réduction de cette dépendance – notamment dans le but d'assurer le maintien postural, ce qui constitue autant de ressources attentionnelles non-allouées à l'environnement lui-même et donc à l'émergence du sentiment de présence.

Ces résultats montrent que la dimension de la dépendance à l'égard du champ n'est pas une valeur stable et figée, et qu'au contraire la compréhension de sa dynamique peut apporter une certaine lumière sur les interactions homme-machine et les différents facteurs humains en jeu dans cette équation. En effet, lorsque l'on considère le groupe d'individus augmentant leur dépendance au champ visuel durant l'immersion, il est possible d'argumenter qu'il s'agit également d'un mécanisme d'adaptation. Ces participants, initialement moins dépendants à l'égard du champ, auraient profité de leur moindre sensibilité aux cybermalaises et de leurs capacités d'inhibition pour effacer les stimuli non pertinents et faire émerger un sentiment de présence. Puis, et puisque l'immersion est largement constituée d'informations sensorielles visuelles, ces participants auraient peu à peu augmenté leur dépendance au champ jusqu'à un seuil non problématique, améliorant leur immersion sans subir les effets négatifs des cybermalaises afin de s'adapter pleinement à un environnement majoritairement visuel. Au contraire, les individus initialement dépendants à l'égard du champ se seraient trouvés directement en situation de conflit sensoriel et auraient, comme mécanisme de recalibration, diminué drastiquement l'importance accordée dans l'intégration multisensorielle aux informations visuelles. Cette diminution aurait poussé ces individus à utiliser un style cognitif auquel ils ne sont pas habitués, notamment à travers une utilisation des informations visuelles imposée comme inhabituellement basse, ce qui a pu détériorer leur expérience et notamment leur sentiment de présence. Considérant les individus du groupe présentant une stabilité dans leur dépendance au champ (évol0), il peut être considéré que ces individus présentent eux une forte rigidité dans leur style cognitif. En effet, et alors qu'ils sont aussi sensibles aux cybermalaises et présentent des taux de présence similaires aux groupes diminuant leur dépendance au champ, ces derniers ne montrent aucune différence dans leur mesure pré et post immersion. Deux argumentations sont possibles. Soit ces individus n'étaient initialement sensibles aux cybermalaises que de façon modérée et n'ont donc pas eu le besoin de recalibration et de compensation, présentant ainsi des niveaux similaires aux individus post-recalibration, soit ces individus n'ont pas la flexibilité cognitive nécessaire pour réaliser cette recalibration. Dans ce

cas, il est possible d'argumenter que ces individus, lors d'immersions plus longues ou plus stimulantes, finiraient par être largement plus atteints par les symptômes négatifs que les individus réalisant la recalibration.

5.3.4. Limites et perspectives

Les limites de l'étude Nav(i)r sont, encore une fois, inhérentes aux outils utilisés, notamment les questionnaires. Il est toutefois regrettable de ne pas pouvoir utiliser les données de performance au test de cognition spatiale lors des comparaisons entre les groupes, car dépendance à l'égard du champ et habilités spatiales sont, dans la littérature, profondément associées (Evans et al., 2013; Pithers, 2002). Enfin, il serait intéressant pour aller plus loin de pouvoir mesurer cette dépendance au champ sur un temps plus long, par exemple quelques heures puis quelques jours, voire après quelques semaines, afin de pouvoir analyser la durée de son évolution. De façon similaire, il serait pertinent de trouver une façon d'analyser la dépendance au champ à plusieurs moments durant l'immersion, plutôt que sur une simple variable avant et après l'exposition. Il serait également intéressant que cette évolution soit mesurée systématiquement dans les études explorant la dépendance à l'égard du champ, afin de permettre une comparaison entre les types d'environnements et de tâches proposés. Enfin, il convient de statuer qu'aucun des résultats empiriques ne permettent de confirmer qu'il s'agit de mécanismes compensatoires, et que ces interprétations sont purement spéculatives. Des études supplémentaires dans des environnements plus perturbants visuellement sont nécessaires.

Concernant le sentiment de présence historique, il serait intéressant, afin de pouvoir explorer plus en détail ce concept, de proposer des environnements similaires incorporant des détails anachroniques ou non. Il convient cependant de répéter qu'il est difficile de comparer la pertinence d'une nouvelle dimension de la présence, et que des études supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ou non cette cohérence, d'autant plus que celle-ci est révélée comme relativement faible par l'oméga de McDonald. Ces remarques sont également justifiées concernant les différentes mesures de jeux vidéo, d'autant plus qu'il existe de nombreux autres aspects à la pratique vidéoludique que le genre de jeux vidéo pratiqués, par exemple le support utilisé (ordinateur de jeux ultra-performant ou téléphones portables) ou encore la familiarité avec la réalité virtuelle ou le visionnage de films en trois dimensions. L'investigation d'une mesure incorporant ces différentes dimensions pourraient s'avérer pertinente pour les nombreux utilisateurs de la réalité virtuelle, mais aussi tous les chercheurs s'intéressant à l'impact de la pratique des jeux vidéo sur le comportement humain.

5.3.5. Conclusion de l'étude

Au-delà d'explorations révélant la validité du concept de présence historique ou la pertinence de prendre en compte le genre de jeux vidéo pratiqués autant que la fréquence de cette même pratique, le résultat principal de cette étude est qu'une simple immersion en réalité virtuelle (d'une durée moyenne relativement courte de moins de cinq minutes) soit suffisante pour induire des fluctuations dans la dépendance au champ des participants, et que ces fluctuations ne sont pas les mêmes pour tous les individus. La plupart des participants semblent en effet réduire leur dépendance au champ, probablement dans un but compensatoire destiné à réduire l'effet des cybermalaises, ces derniers étant majoritairement issus de conflits perceptifs entre informations visuelles et non visuelles (vestibulaires et haptiques). Si une partie à peu près équivalente des individus présente une légère diminution ou une stabilité dans leurs fluctuations, une certaine partie d'individus semblent au contraire augmenter leur dépendance au champ. Ces derniers sont statistiquement différents des deux autres groupes : ils sont initialement moins dépendants au champ, se disent plus présents durant l'immersion et rapportent moins de cybermalaises. Leur fluctuation vers un style cognitif plus dépendant à l'égard du champ peut être compris, à l'instar de ce qu'il se passe parmi les participants du groupe opposé, comme un mécanisme d'adaptation pour profiter davantage des informations, majoritairement visuelles, de l'environnement virtuel. Ces fonctionnements opposés entre les individus de chaque côté de la dimension dépendance au champ peuvent expliquer pourquoi celle-ci semble avoir un impact fort dans Neuroprésence et non dans Spatioprésence. En effet, comme nous l'avons discuté précédemment, Neuroprésence comportait un flux visuel qui a pu stimuler une baisse globale de la dépendance au champ (même les participants initialement moins dépendants ont dû, face à ce flux perturbant, réduire leur dépendance), impactant au passage les facteurs humains annexes tels que le sentiment de présence ou les cybermalaises. Au contraire, Spatioprésence présentant un environnement relativement peu cinétogène, l'immersion a stimulé les différences entre les deux comportements (augmentation ou diminution de la dépendance), nuisant aux analyses statistiques sur sa variance en regroupant les valeurs des deux pôles opposés.

La conclusion de cette étude est donc que ce n'est pas la dépendance au champ en elle-même qui est informative, mais son évolution, bien que cette dernière semble pouvoir être prédite par le niveau initial. Cette étude soulève donc la prise en compte de l'évolution dynamique de la dépendance au champ comme lors de l'exploration de cette dimension du style cognitif, que ce soit dans le cadre de la réalité virtuelle ou non. En effet, puisque les deux pôles du continuum tendant – paradoxalement – vers une atténuation des différences, la dépendance au champ peut sembler

peu informative en réalité virtuelle si elle est mesurée a posteriori. Pourtant, les dynamiques et processus derrière ce groupement vers la moyenne ne sont probablement pas de même nature : ils semblent imposés brutalement par les uns pour réduire la situation problématique du conflit sensoriel, et adaptés peu à peu par les autres pour optimiser l'expérience. Toutes ces données sont issues du fait qu'une immersion – peu perturbante visuellement – de quelques minutes suffise à provoquer des différences fortes entre des individus différents. Ceci et permet de souligner la dépendance à l'égard du champ comme une composante importante du profil cognitif affectant l'expérience utilisateur en réalité virtuelle, ainsi que de mettre en emphase la place des facteurs humains en réalité virtuelle, et notamment de leurs impacts et évolutions différentes lorsque confrontés aux facteurs systèmes.

5.4. Eduprésence : étude sur l'apprentissage

5.4.1. Présence et performance d'apprentissage

L'objectif premier de cette étude était d'évaluer si le sentiment de présence améliore l'apprentissage dans un environnement pédagogique présentant un contenu de patrimoine culturel sur un grand écran stéréoscopique accompagné d'une visite pédagogique. Considérant la corrélation uniquement tendancielle et l'absence de prédiction lors des régressions linéaires entre sentiment de présence et transfert de connaissances, il ne serait pas fidèle au principe de parcimonie de donner une réponse positive absolue. Cependant, ce résultat peut être discuté et nuancé pour s'intégrer dans le cadre global de ce travail. Premièrement, car l'environnement utilisé était un environnement peu immersif : partager un écran stéréoscopique dans un amphithéâtre, sans aucun moyen d'interaction avec l'environnement virtuel, devant un guide réel présentant le contenu, et tout ceci en même temps qu'une centaine de personnes n'est généralement pas considéré comme un système de réalité virtuelle profondément immersif. Il est donc possible de considérer que cet effet tendanciel est causé par une immersion trop faible engendrant des niveaux de présence trop peu élevés pour affecter l'apprentissage. Deuxièmement, car la variable présence et la variable performance d'apprentissage étaient très fortement corrélées à une troisième variable : l'intérêt pour le contenu historique. Cette variable intérêt pour le contenu historique était, rappelons-le, mesurée très simplement avant l'expérimentation virtuelle par une simple question sur une échelle de Likert demandant au participant de noter son intérêt pour la période de la Rome Antique. Cette variable s'est révélée être à la fois prédictive de la performance d'apprentissage et du sentiment de présence, ce qui n'est pas surprenant considérant l'impact des ressources attentionnelles sur chacun de ces phénomènes (Abernethy et al., 2012; Bystrom et al., 1999; Draper et al., 1998; Navon & Gopher, 1979). En plus d'apporter des pistes supplémentaires concernant les liens entre ressources attentionnelles, présence et performance, ces résultats soulignent que la présence, mais aussi les autres facteurs humains connexes, n'influencent pas ou peu la performance d'apprentissage dans des environnements multi-utilisateurs peu immersifs, préconisant ainsi leur utilisation, notamment pour la transmission pédagogique historique, architecturale et patrimoniale.

5.4.2. Modération des facteurs humains

Pour aller plus loin dans la compréhension de la relation entre sentiment de présence et performance d'apprentissage dans ce contexte, l'analyse des facteurs humains associée à la réalité virtuelle et leurs possibles modérations sur cette relation constituait le deuxième objectif de cette

étude. Cependant, à l'exception d'une nouvelle confirmation de la forte relation entre expérience vidéoludique et sentiment de présence, ainsi qu'entre expérience vidéoludique et cybermalaises (l'expérience vidéoludique étant un prédicteur significatif des deux variables), la plupart des associations retrouvées dans la littérature ou dans les études précédentes (Neuroprésence, Spatio-présence) se sont révélées être soit inexistantes soit particulièrement faibles, notamment la relation entre présence et cybermalaises, ou tout impact de la dépendance au champ. Encore une fois, ceci doit être considéré au regard du système utilisé, à la fois peu immersif puisque ne comportant pas d'interaction, et peu englobant puisque projeté sur écran. Cette session pédagogique virtuelle est en effet à la limite de ce que l'on peut considérer comme de la réalité virtuelle (certains auteurs considèreraient d'ailleurs que ce n'en est pas). Cependant, il convient de noter que ce type de visite virtuelle pédagogique présente un fort pouvoir éducatif, puisqu'il permet d'immerger en même temps toute une cohorte d'apprenants. Même en présentant une immersion faible, ce type d'environnement virtuel pédagogique offre de nombreux avantages éducatifs présentés en introduction de ce travail. Il s'agit du support le plus susceptible d'être utilisé dans le milieu universitaire et pédagogique, en raison des faibles coûts, que ce soit en temps ou en argent. Il devient alors important d'étudier plus en avant, comme c'est le cas dans cette étude, l'impact que les facteurs humains peuvent avoir sur l'apprentissage. Les résultats empiriques montrent que la plupart des processus classiques de la réalité virtuelle semblent se reproduire également dans ce format grand écran stéréoscopique, mais sous une forme plus légère. Pour poursuivre les discussions précédentes, il semblerait que la constitution du profil cognitif soit confirmée, notamment au vu des liens entre jeux vidéo, présence et cybermalaises, mais que celui-ci, confronté à un environnement trop peu immersif, n'ait pas ou peu d'impact sur l'expérience utilisateur et donc la performance en réalité virtuelle. Cette interprétation est donc similaire à celle de Neuroprésence, à l'exception que si la présence n'affectait pas la performance au Wisconsin Card Sorting Test ce n'était pas parce que l'environnement était trop peu immersif, mais parce que la tâche était trop peu intégrée à l'environnement. Cette lecture est corroborée par les différentes analyses en composantes principales : dans Neuroprésence, le sentiment de présence est associé aux différents facteurs humains, mais situé dans une composante différente de la performance. Dans Spatio-présence, à l'exception de la dépendance au champ exclue car nécessitant des analyses plus poussées, présence, performance et facteurs humains partagent une même composante. Enfin, dans Eduprésence, la présence partage à la fois la composante du profil cognitif (expérience vidéoludique, cybermalaises) et celle de la performance (intérêt et performance d'apprentissage). Ce sentiment de présence à mi-chemin entre facteurs humains et performance dû à un environnement peu immersif et à une absence d'interaction peut expliquer pourquoi celle-ci n'impacte

pas la performance d'apprentissage : un environnement peu immersif et stimulant engendre une pondération plus faible du profil perceptivo-cognitif et donc de l'expérience utilisateur sur la performance à la tâche.

L'absence d'effet direct entre présence et performance, au-delà d'une contradiction des hypothèses, est une bonne chose : cela signifie que des applications éducatives à grande échelle peuvent être utilisées sans avoir à se soucier des inégalités en termes d'effets négatifs et de performances. En effet, les personnes ayant une plus grande expérience des jeux vidéo, une plus grande présence et une moindre susceptibilité aux cybermalaises ne semblent pas être avantagées dans l'accomplissement de la tâche d'apprentissage de Eduprésence, contrairement aux évaluations Spatioprésence. Les ressources attentionnelles, dont la manifestation peut être associée à la variable de l'intérêt personnel pour le contenu historique, devraient être mises en évidence comme le principal vecteur de l'apprentissage. Il convient de noter que à nouveau la dépendance au champ n'était corrélée à aucune autre variable : il peut être argumenté que, de nouveau, la qualité immersive du système était trop faible pour déclencher des différences entre les deux styles cognitifs, par exemple sur la gestion de l'intégration multisensorielle, ou encore que le matériel utilisé, le Test des Figures Entremêlées, était moins sensible que le Test de la Baguette et du Cadre.

5.4.3. Distance par rapport au point de référence stéréoscopique

Un résultat intéressant et avec des applications pratiques de cette étude expérimentale est l'étude de la distance entre le participant et le point de référence stéréoscopique, qui associé avec la pratique des jeux vidéo, permet de prédire significativement (bien que faiblement) les cybermalaises. Bien qu'il n'ait pas été constaté que les cybermalaises affectent directement la présence ou la performance, cela fait de la distance par rapport au point de référence stéréoscopique une variable potentiellement importante à prendre en compte, même si la variance expliquée semble relativement faible. Si ces données ne font pas de la distance par rapport au point de référence stéréoscopique une question cruciale pour les applications virtuelles pédagogiques, il pourrait être important d'un point de vue méthodologique de randomiser le placement lors de l'utilisation de systèmes virtuels à grande échelle ou lors d'études portant sur les cybermalaises. De plus, ce résultat fait écho à des études récentes sur la distance par rapport à l'écran qui semble impacter la perception de la profondeur des participants en réalité virtuelle (Vienne et al., 2020). Il peut donc s'avérer méthodologiquement important de systématiquement randomiser le placement des participants lorsqu'un matériel similaire est utilisé. Enfin, ces résultats fournissent également des informations supplémentaires pour corroborer l'origine du décalage sensoriel des cybermalaises

et du mal des transports (Bos et al., 2008; Reason & Brand, 1975; Rebenitsch & Owen, 2016a). En effet, une grande distance par rapport au point de référence stéréoscopique entraîne également un plus grand décalage entre ce que perçoit chacun des yeux, décalage pouvant expliquer que cette distance est un prédicteur significatif des cybermalaises.

5.4.4. Mesure de l'expérience vidéoludique

De façon similaire aux comparaisons réalisées dans l'étude Nav(i)r, il semble que la prise en compte de plusieurs dimensions pour rendre compte du facteur jeux vidéo permette non seulement une meilleure cohérence théorique mais aussi empirique. En effet, la prise en compte du nombre d'heures passées à jouer aux jeux vidéo semble une donnée légèrement plus objective qu'une évaluation sous le format d'une échelle de Likert, largement dépendante de la perception d'un individu. De plus, ce nombre d'heure, lorsqu'associé à la familiarité avec la réalité virtuelle, la fréquence de visionnage de films 3D ainsi que le type de jeux vidéo pratiqués (*casual* ou *intensive*), et le support utilisé (ordinateurs et consoles de salon ou téléphones et consoles mobiles) permettent la construction d'un score empiriquement pertinent. En effet, malgré une cohérence interne relativement faible (oméga de McDonald inférieur à .6), ce score (intitulé expérience vidéoludique) permet des associations avec les autres variables de la réalité virtuelle bien plus fortes que la simple prise en compte de la fréquence de jeux. En effet, non seulement l'expérience vidéoludique est corrélée au sentiment de présence et aux cybermalaises, mais elle prédit également significativement ces derniers lors des régressions linéaires. Ces données semblent au passage corroborer l'interprétation de l'habituation au cybermalaises. En effet, les participants de Eduprésence n'ayant accès à aucune interface, l'effet des jeux vidéo ne peut s'expliquer par la familiarité homme-machine seule. Il convient donc de considérer un effet d'entraînement et d'habituation aux cybermalaises par la pratique des jeux vidéo, notamment dépendante du type de jeux pratiqués puisque la fréquence de jeux vidéo seule n'est associée à aucune autre variable de l'expérimentation. Il est possible de spéculer et de considérer que la fréquence de jeux seule serait informative s'il existait une interface dans cet environnement. De fait, il semble pertinent de considérer que la prise en compte de cette expérience vidéoludique soit bien plus informative pour l'analyse du profil cognitif et donc de l'expérience utilisateur en réalité virtuelle que la simple mesure de la fréquence de jeux. Il est même possible d'aller plus loin et de considérer que l'habituation au conflit perceptif provoqué par l'expérience vidéoludique soit accentué dans cette étude par l'effet « conducteur », l'effet expliquant pourquoi les conducteurs de voitures sont moins sujets au mal des transports que les passagers (Rolnick & Lubow, 1991). En effet, comme les participants de l'étude ne maîtrisaient pas directement les mouvements dans l'environnement, ils ne pouvaient

pas s'attendre aux conséquences des actions effectuées et étaient donc plus sensibles aux incohérences sensorielles (tout comme le conducteur prédit les conséquences sensorielles de ses actions de pilotage). Mais les joueurs de jeux vidéo, habitués à ce type de situation, pouvaient plus facilement anticiper les mouvements du guide et leurs retours perceptifs, ce qui réduisait l'apparition du mal des transports.

5.4.5. Limites et perspectives

Les limites de cette étude sont similaires à celles des études précédentes, avec une donnée supplémentaire qui est celle de l'expérimentation à grande échelle. Bien que les participants aient joué le jeu et signé un formulaire de consentement éclairé indiquant la nécessité de respecter les consignes, il est impossible de contrôler effectivement ce qui se passe dans un amphithéâtre. Deux personnes discutant, même à voix basse, peuvent par exemple suffire à produire une variable parasite nuisant à l'immersion de leurs voisins. Cet effet peut être contrebalancé par le fait qu'il est assuré que chaque séance d'expérimentation était identique, puisqu'il n'en existait qu'une. Malgré cela, cette étude fournit de nombreuses applications pour les acteurs de la réalité virtuelle, au-delà de contribuer à son développement théorique en investiguant les concepts en jeu. Tout d'abord, et bien que ce résultat demande à être confirmé, elle permet de considérer que les facteurs humains de la réalité virtuelle (pratique des jeux vidéo, cybermalaises) ne sont pas problématiques pour une utilisation à grande échelle des environnements virtuels pédagogiques sur grand écran. Deuxièmement, elle fournit des conseils pragmatiques dans ce cadre : bien que celui-ci semble avoir relativement peu d'impact, le point de référence stéréoscopique devrait dans l'idéal être placé au milieu de la pièce afin d'être aussi peu éloigné d'un maximum d'utilisateurs, et les utilisateurs doivent être invités à se rassembler autour de ce point. La distance de chaque utilisateur par rapport au point de référence stéréoscopique devrait cependant être contrôlée systématiquement pour des études portant sur les cybermalaises dans ce genre d'environnements. Enfin, cette étude permet d'avancer la compréhension du profil cognitif et de l'expérience utilisateur, notamment en proposant des mesures plus fines des facteurs humains en jeu telle que l'expérience vidéoludique. Cependant, des études supplémentaires sont nécessaires pour explorer plus en détail et valider ces différentes mesures. Il serait par exemple envisageable et pertinent de rentrer plus en détail dans le type de jeux vidéo pratiqués, et ce au-delà de la simple séparation entre *casual* et *intensive games*. En effet, Johnson et al., (2015) ont par exemple montré que les jeux d'arène multijoueur, s'ils déclenchent davantage de compétition et d'investissement, déclenchent moins de présence pour les joueurs. Cette prise en compte pourrait permettre une classification des types de jeux plus détaillée prenant en compte leurs processus et leurs effets sur les

variables de la réalité virtuelle. Enfin, des études futures devraient être réalisées pour examiner les avantages pédagogiques de la réalité virtuelle, par exemple en comparant les classes d'enseignement traditionnelles aux installations virtuelles.

5.4.6. Conclusion de l'étude

Le résultat principal de cette étude est qu'il existe peu ou pas de biais inter sujets lors de l'utilisation d'environnements virtuels pédagogiques sur grand écran stéréoscopique. En effet, si l'immersion proposée par une séance en amphithéâtre, peu englobante, semble reproduire les associations retrouvées dans les études précédentes (Neuroprésence, Spatioprésence) ainsi que dans la littérature, ces dernières ne semblent pas impacter la performance, bien plus largement affectée par l'intérêt pour le contenu historique de chacun des participants. Il convient cependant de noter la confirmation de la place prépondérante de l'expérience vidéoludique au sein des facteurs humains impactant la réalité virtuelle. En effet, et malgré un environnement peu immersif, cette expérience vidéoludique prédit significativement sentiment de présence comme cybermalaises. Il est par ailleurs intéressant de voir que l'intérêt pour le contenu historique est prédictif à la fois de la performance au test d'apprentissage, mais également du sentiment de présence, ce qui semble corroborer un lien très fort entre performance, présence et ressources attentionnelles. Les résultats empiriques permettent également de poursuivre une cohérence théorique avec les expérimentations précédentes, notamment en avançant l'investigation conceptuelle du profil cognitif, de l'expérience utilisateur et de la performance à la tâche selon l'intégration de cette même tâche dans l'environnement virtuel et des caractéristiques systèmes. De plus, cette étude permet de souligner des applications pragmatiques, par exemple en prouvant que le placement dans un amphithéâtre impacte, bien que légèrement, l'émergence de cybermalaises, ou encore en proposant une évaluation de la présence historique et de l'expérience vidéoludique. Ces résultats et discussions permettent donc de mettre en valeur les environnements virtuels éducatifs et de valoriser ces nouvelles formes d'approche pédagogique et de nouvelles formes de présentation soutenues par les théories constructivistes de l'apprentissage.

5.5. Analyses transversales

5.5.1. Analyses intragroupes

Il est intéressant de voir que toutes les études réalisées et analysées (Neuroprésence, Spatioprésence, Eduprésence) présentent des niveaux de sentiment de présence supérieurs aux échantillons normalisés, ainsi que des niveaux inférieurs de cybermalaises (Bouchard et al., 2007; 2008; Robillard et al., 2002). Ces comparaisons n'ont pas pour but de vanter les qualités immersives de nos expérimentations ; il est en effet nécessaire de prendre en compte le fait que depuis la réalisation des analyses factorielles constituant les normes, les systèmes immersifs – matériels comme logiciels – ont largement évolué. Cependant, ces comparaisons permettent une certaine forme de validation de nos études, puisque trouver des scores de présence inférieurs ou de cybermalaises supérieurs aurait largement remis en cause la pertinence des résultats.

5.5.2. Analyses intergroupes

Il semble à première vue particulièrement surprenant (et contraire aux hypothèses expérimentales) que l'étude Neuroprésence soit celle pour laquelle les participants rapportent le plus de présence et le moins de cybermalaises. En effet, celle-ci comportait non seulement une tâche peu intégrée à l'environnement virtuel, mais également un flux visuel non pertinent avec la position statique des utilisateurs ainsi qu'une interaction très fortement limitée. Au contraire, Spatioprésence comportait un environnement large, une tâche de cognition spatiale très intégrée à la navigation et à l'interaction au sein du monde virtuel, ainsi que des moyens de locomotion réduisant les cybermalaises (la téléportation). Ces résultats semblent opposés non seulement à nos hypothèses a priori, mais également aux données et discussions de la littérature. Cependant, différentes données permettent de relativiser cet apparent paradoxe. La première est que dans l'expérimentation Neuroprésence, les participants étaient à la fois assis virtuellement dans une charrette et assis physiquement sur un tabouret, alors que les participants de Spatioprésence, afin de permettre le déplacement dans l'environnement à 360°, se tenaient debout. Or, la posture des participants lorsque confrontés à un conflit sensoriel semble une donnée importante, notamment en considération des théories proposant une origine d'instabilité posturale au mal des transports et autres cinétoses (Barrett, 2004; Munafo et al., 2017; Stoffregen & Smart, 1998; Weech, Calderon, et al., 2020; Weech et al., 2018). Il est donc fort possible que cette position assise ait réduit l'instabilité posturale et donc les cybermalaises des participants de Neuroprésence par rapport à ceux de Spatioprésence. Cependant, les participants de Eduprésence étaient eux aussi assis, et pourtant davantage sensibles aux cybermalaises que ceux de Neuroprésence. Une explication

pourrait être l'utilisation d'un cadre de référence statique (les deux charrettes) qui permet un repère stable et donc une atténuation de l'effet de conflit sensoriel (Barrett, 2004; Duh et al., 2001; Prothero et al., 1999). De plus, il est possible que le fait de ne pas être directement au contrôle de l'environnement virtuel augmente les symptômes de cybermalaises, tout comme le fait de ne pas conduire un véhicule augmente les symptômes de mal des transports (Dong et al., 2011; Rolnick & Lubow, 1991). Une explication généralement donnée consiste à considérer que le conducteur, étant au contrôle du véhicule, connaît à l'avance les mouvements qu'il va ordonner au véhicule, ce qui permet une préparation prédictive aux stimuli afférents, notamment via des mouvements compensatoires de la tête, des yeux et de la posture, et ceci dans le but de compenser ces mouvements potentiellement porteurs de conflits sensoriels (Rolnick & Lubow, 1991). De la même manière, le spectateur d'un environnement virtuel qui n'est pas aux commandes ne connaît pas à l'avance les déplacements et perturbations visuelles qui leur sont associés. Considérant que les effets de l'âge ou de la durée d'exposition avaient été contrôlés, ces hypothèses explicatives semblent les plus crédibles pour interpréter ces résultats d'apparence contre-intuitive.

5.5.3. Analyses agrégées

Le principal résultat de ces analyses sur les données des trois expérimentations normalisées et agrégées est que le sentiment de présence est un prédicteur de la performance. Cet effet, s'il est fortement significatif, il est cependant relativement faible, car ce modèle n'explique que 4% de la variance de la performance. De plus, et en accord avec les hypothèses de départ, la pratique des jeux vidéo et les cybermalaises sont les meilleurs prédicteurs du sentiment de présence, alors que le genre et la dépendance au champ ne semblent pas impacter ce sentiment de présence directement. Cependant, il ne serait pas fidèle au principe de parcimonie de dire que le genre et la dépendance au champ n'ont pas d'impact du tout en réalité virtuelle : en effet, ces deux dimensions interagissent significativement avec la pratique des jeux vidéo pour prédire les cybermalaises. Ce résultat tend à confirmer les hypothèses explicatives proposées en amont : il existe différents facteurs humains en interaction continue constituant un profil cognitif qui va, une fois confronté aux facteurs systèmes, moduler l'expérience utilisateur et à travers elle impacter la performance en réalité virtuelle. Ces interactions, si elles ne permettent pas de définir un sens de causalité, sous-tendent les explications énoncées précédemment et permettent d'envisager que toutes ces pistes interprétatives coexistent et co-interagissent : les sujets féminins sont non seulement moins poussés culturellement à pratiquer les jeux vidéo, mais ils sont aussi plus sensibles aux cybermalaises et plus dépendants à l'égard du champ (par exemple à cause d'une moindre pratique des jeux de construction durant l'enfance) ce qui leur rend les jeux vidéo moins attirants

car davantage cinétogènes, et les empêche de profiter de leurs effets d'habituations sur les cybermalaises ou encore de leur effet d'entraînement sur la dépendance au champ. Il est particulièrement intéressant de noter que le genre est un facteur significatif, bien qu'en interaction, des analyses agrégées, alors qu'il tendait à disparaître sous d'autres variables (notamment la pratique des jeux vidéo) dans les études précédentes. Il est nécessaire de rappeler que pour toutes les études, la distance interpupillaire, que Stanney et al. (2020) recommande de contrôler, ne l'était pas, et que l'expérimentateur était un homme, ce qui peut causer des menaces du stéréotype, prouvées sur la dépendance au champ et sur la pratique informatique (Drażkowski et al., 2017; Koch et al., 2008). Quoiqu'il en soit, l'existence de deux composantes à la réalité virtuelle, une partie profil cognitif composée de la dépendance au champ, de la pratique des jeux vidéo et du genre, et une partie expérience utilisateur composée du sentiment de présence de la performance et des cybermalaises, est soulignée par l'analyse en composantes principales sur ces données normalisées qui montrent une forte corrélation ($r = .258$) entre ces deux parties. Il est particulièrement intéressant de noter, sur le graphique associé (Figure 24), que les facteurs présence et performance sont très fortement superposés ainsi qu'en parfaite opposition aux cybermalaises.

Certaines hypothèses de cette étude n'ont cependant pas été validées dans ces analyses, par exemple l'association directe entre dépendance au champ et sentiment de présence. Cette relation, très forte dans Neuroprésence et absente de Spatioprésence ou de Eduprésence, existe cependant sous la forme d'une interaction indirecte : en effet, la dépendance à l'égard du champ interagit avec le genre et la pratique des jeux vidéo pour prédire les cybermalaises, seuls prédicteurs de la présence. Il est donc possible d'argumenter que non seulement cette association est dépendante du contexte, selon si celui-ci est à même de déclencher des différences entre les styles cognitifs, mais aussi des participants, puisqu'elle semble plus informative chez les participants féminins ou peu joueurs de jeux vidéo. De plus, il convient de noter que l'évolution de cette dépendance au champ, mise en avant par l'étude Nav(i)r comme indispensable pour une bonne compréhension de cette dimension, n'a pas été prise en compte dans ces analyses, de la même façon que l'exploration multidimensionnelle de l'expérience vidéoludique, absente de Neuroprésence. Du reste, il est intéressant – et rassurant – de voir qu'il n'existe pas d'effet direct du genre sur la performance, malgré le fait que ce dernier soit un facteur explicatif des cybermalaises, puisque les femmes rapportent systématiquement davantage de symptômes négatifs que les hommes. Il est donc possible d'argumenter qu'il existe des mécanismes compensatoires permettant aux sujets féminins de réaliser en réalité virtuelle un niveau de performance équivalent aux hommes tout en étant plus sensibles aux cybermalaises, et alors que ceux-ci impactent fortement la présence et donc la performance.

5.5.4. Limites et perspectives

Il peut bien évidemment sembler étrange de réaliser des analyses sur des données issues de cadres expérimentaux différents, bien que ce processus ne soit pas sans rappeler celui des méta-analyses. En effet, si présence et performance de cognition spatiale sont étroitement associées dans Spatioprésence, il n'existe pas d'association directe significative dans Neuroprésence ni dans Eduprésence : la première utilisant une tâche trop peu intégrée dans l'environnement, et la deuxième un environnement trop peu immersif. De plus, les tailles variables d'échantillons (deux fois plus dans Eduprésence que dans Spatioprésence et Neuroprésence) influencent différemment les analyses. Cependant, la normalisation de ces données permet des comparaisons relativement intéressantes et permet de distinguer des tendances générales des environnements virtuels. Evidemment, une méta-analyse complète dans le futur sur ce type de données permettrait d'aller plus loin dans la compréhension des dynamiques entre facteurs humains et performance en réalité virtuelle, par exemple en réalisant des analyses statistiques sur les données statistiques de chaque expérimentation. Il est en effet important d'observer si des différences de performance inhérentes aux études en réalité virtuelle existent, ou simplement de constituer des données de références associant facteurs humains et performance lors de passations in virtuo afin de pouvoir comparer les scores obtenus aux normes individuelles. Une limite profonde de ces analyses demeure le niveau inégal de pratique des jeux vidéo et de dépendance au champ selon le sexe qui ne permet pas de distinguer pleinement les effets de chacune de ces variables, notamment concernant leurs effets sur les cybermalaises. Des études futures sur un échantillon constitué de femmes présentant une pratique des jeux vidéo ou une dépendance à l'égard du champ égale à celle des hommes permettrait d'aller beaucoup plus loin dans les analyses, notamment dans le but de démêler les interactions entre pratique des jeux vidéo, dépendance à l'égard du champ et genre, que ce soit sur les cybermalaises ou le sentiment de présence. Enfin, les comparaisons des scores et les différences significatives trouvées aux Questionnaires sur l'Etat de Présence et aux Questionnaires sur les Cybermalaises par rapport à leurs échantillons de référence suggèrent un potentiel besoin de mise à jour des normes.

5.5.5. Conclusion des analyses transversales

Le principal résultat de ces analyses transversales consiste en la confirmation d'une interaction de facteurs humains permettant de prédire non seulement les cybermalaises, mais aussi indirectement le sentiment de présence, et à travers cette interaction, la performance en réalité virtuelle. Ce résultat est notamment souligné par l'analyse en composantes principales sur les données normalisées : il existe un profil cognitif, exploré tout au long des études précédentes, composé

majoritairement de la pratique des jeux vidéo et de la dépendance au champ. Celui-ci va s'articuler avec les facteurs systèmes (notamment le degré d'intégration de la tâche dans l'environnement virtuel ou les capacités cinétogènes du matériel et du contexte) pour moduler l'expérience utilisateur, composée du sentiment de présence, des cybermalaises et de la performance. Comme énoncé précédemment, ces quelques variables ne sauraient être exhaustives, et ne sont que les manifestations mesurées d'un profil et d'une expérience favorable à la réalité virtuelle.

Au-delà de ce résultat principal, les comparaisons entre expérimentations révèlent des effets intéressants semblant aller, à première vue, à contre-courant des hypothèses et données habituelles de la littérature, notamment le fait que les participants de l'étude Neuroprésence rapportent davantage de présence et moins de cybermalaises que ceux de Spatioprésence. Cependant, la prise en compte détaillée du contenu visuel et du contexte de passation a permis de rendre compte des paradoxes apparents, par exemple au regard de la position debout ou assise des participants expliquant les différences de cinétoses, du contrôle du participant sur les mouvements virtuels, ou encore du cadre de référence visuel. L'impact de cette position debout sur les taux de symptômes négatifs rapportés permet de considérer les cybermalaises comme au moins aussi dépendants du contexte que du matériel utilisé. L'utilisation de procédés permettant de réduire l'apparition de cybermalaises devrait donc être au cœur des préoccupations de tous les acteurs de la réalité virtuelle : non seulement ceux-ci sont peu plaisants pour les participants, mais ils sont également directement corrélés à une moindre performance, et sont de forts prédicteurs du sentiment de présence, lui-même prédicteur de la performance. Des recommandations destinées aux acteurs de la réalité virtuelle, notamment du secteur académique, sont proposées dans la partie suivante. Ces recommandations sont fondées à la fois sur la revue de littérature du cadre théorique mais aussi sur les résultats des différentes études de cette thèse et sont proposées dans la partie suivante. Cependant, avant ces recommandations il convient de synthétiser les résultats empiriques et discussions théoriques de cette thèse et de les mêler à la littérature du domaine, et ce dans le but de présenter un modèle conceptuel des relations entre sentiment de présence, facteurs humains et facteurs systèmes ainsi que leur impact sur la performance en réalité virtuelle.

6. Conclusion

6.1. Modèle conceptuel

Le principal résultat de ce travail est l'exploration de deux composantes de la réalité virtuelle : le profil cognitif – au sens perceptif, cognitif et moteur – et l'expérience utilisateur. Le premier est constitué de l'ensemble et de l'interaction des comportements acquis et innés de l'individu, notamment de sa construction de l'intégration multisensorielle (dépendance au champ, sensibilité au conflit perceptif), de certaines fonctions exécutives (inhibition, flexibilité, habiletés visuo-spatiales, ressources attentionnelles) et de son rapport à l'interaction homme-machine (pratique des jeux vidéo, habiletés sensorimotrices). L'expérience utilisateur est quant à elle issue de la conséquence subjective de l'interaction entre le profil cognitif et les facteurs systèmes (qualité du système immersif, de l'environnement virtuel et de l'interface, nature de la tâche à réaliser). Cette expérience utilisateur est en même temps une conséquence et une cause, puisqu'elle va également moduler le profil cognitif de façon constitutive. Elle agit comme un filtre modulant l'économie des ressources attentionnelles en réalité virtuelle, notamment l'apparition de symptômes de cybermalaises, le rapport à l'ergonomie de l'interface système, et, enfin, l'émergence et le maintien du sentiment de présence. Celui-ci peut être considéré comme l'ensemble des ressources attentionnelles attribuées à l'environnement virtuel et passant le filtre de l'expérience utilisateur. Ainsi, les ressources allouées à l'interface, à l'inhibition de stimuli non-pertinents issus du monde physique ou encore à la résolution du conflit perceptif sont considérées comme autant de ressources non utilisables pour la constitution du sentiment de présence. Le nombre – et la qualité – de ressources inaccessibles est ainsi déterminé par l'interaction entre profil cognitif et facteurs systèmes : un expert de l'interaction homme-machine allouera moins de ressources attentionnelles à l'interface pour les mêmes résultats qu'un non-expert. Cependant, la quantité de ressources attentionnelles étant limitée, l'attention endogène décisionnelle demeure le facteur déterminant premier. Aussi, du degré d'intégration de la tâche dans l'environnement virtuel dépendra la place de la performance au sein de l'expérience utilisateur. Si cette tâche est tout à fait dissociée de l'environnement virtuel alors il y aura séparation des ressources attentionnelles entre sentiment de présence – virtuelle – et performance. Par contre, si elle est intégrée à l'environnement, ces allocations de ressources pourront se superposer : présence et performance seront alors associées, voire se nourriront mutuellement. Il convient de remarquer l'utilisation du terme « virtuelle ». En effet, il est possible d'arguer que si l'attention endogène se porte vers la réalité physique pour résoudre une tâche intégrée à celle-ci, alors un sentiment de présence émergera également, mais

supporté par la réalité physique. Cette conception de la présence, largement inspirée par les théories énaclivistes, fait alors de la relation entre présence et performance la garante de la dimension écologique d'une évaluation, puisqu'elle témoigne de l'intégration de la performance dans l'environnement perçu. Cette relation, que nous nommons angle φ (Phi), donne son nom au modèle.

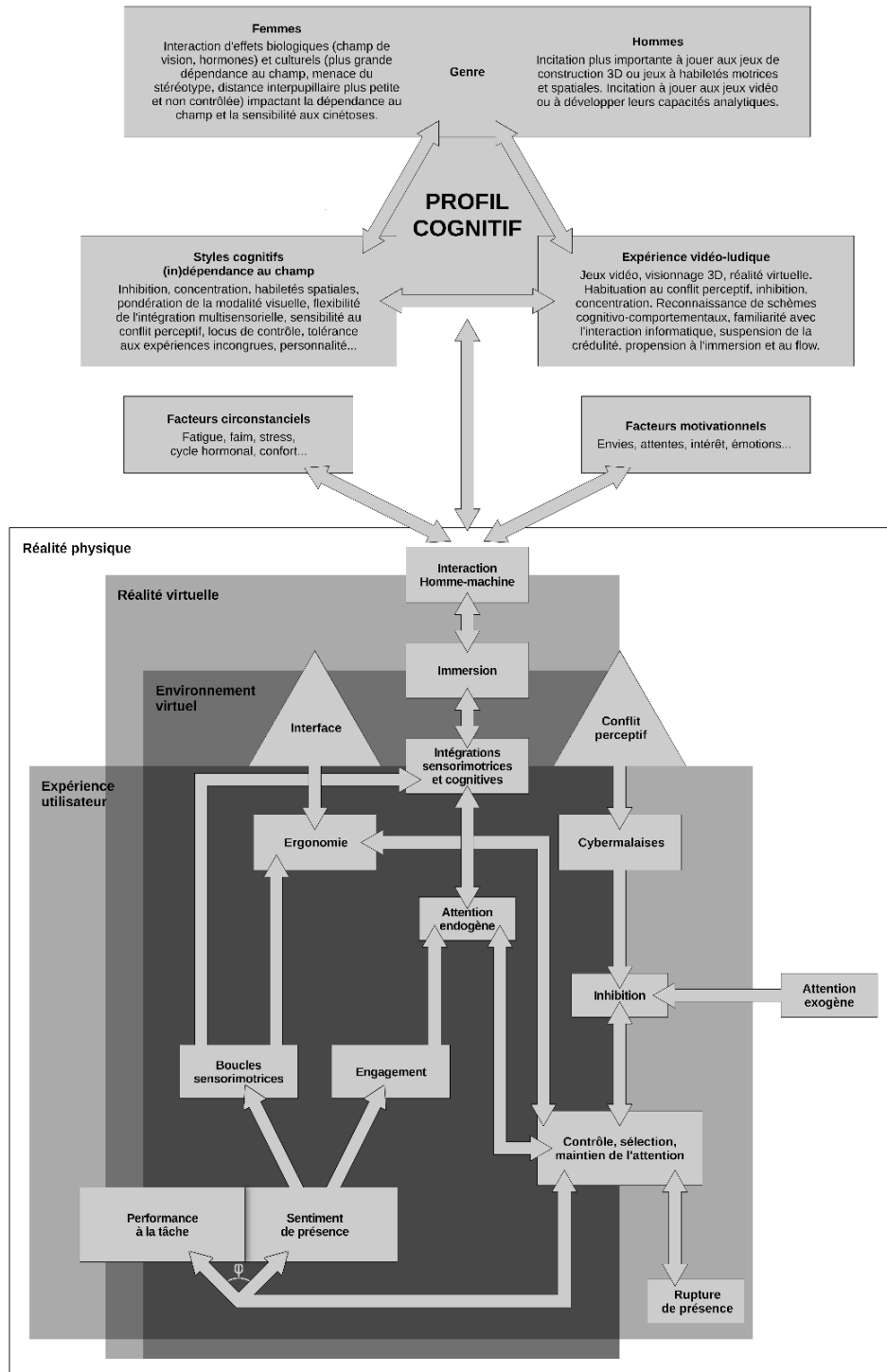


Figure 25. – Représentation graphique du modèle de l'angle φ .

6.1.1. Lecture et interprétation

Le modèle conceptuel graphique (Figure 25) permet de représenter visuellement la synthèse de ce travail : les différents facteurs humains (regroupés ici sous les trois principaux vecteurs étudiés, le genre, le style cognitif et l'expérience vidéoludique) interagissent pour former le profil cognitif. Ce profil, associé aux facteurs circonstanciels et motivationnels, constitue la médiation à travers laquelle l'individu est confronté à la réalité virtuelle ; il s'agit de l'interaction homme-machine. L'expression de réalité virtuelle recoupe dans ce modèle non seulement le matériel informatique immersif (cartes graphiques, processeurs, manettes, écrans ...) mais aussi le logiciel informatique immersif (pilotes, moteur de rendu, synchronisation des écrans ...). Soutenu par la réalité virtuelle et en interaction avec elle, l'individu va ensuite être confronté à l'environnement virtuel : c'est l'immersion. Précisons que l'environnement virtuel est entendu ici comme l'ensemble des stimulations (sensorielles, motrices et cognitives) et des possibilités de comportements soutenues par la réalité virtuelle et proposées à l'utilisateur. Selon son profil cognitif (mais aussi de toutes ses expériences passées) et à partir de la gamme de stimulations possibles, l'individu va extraire et intégrer ses propres médiations et perceptions de l'environnement virtuel.

C'est également à cet instant que l'individu va être confronté, à travers ses intégrations, à deux composantes bien connues de la réalité virtuelle. La première est l'interface, issue des interactions entre réalité virtuelle et environnement virtuel et donnant lieu à l'ergonomie, expérience utilisateur nécessaire permettant l'interaction avec l'environnement virtuel, mais aussi drain de ressources attentionnelles lorsque cette dernière est de mauvaise qualité. En effet, si l'ergonomie est présentée en symétrie aux cybermalaises dans ce modèle et ce alors qu'elle est tout à fait indispensable à la réalité virtuelle, c'est parce qu'il est possible d'argumenter que la seule interface qui ne consomme pas de ressources attentionnelles est celle qui est totalement invisible aux yeux du sujet : plus l'interface nécessite et prend de place dans l'expérience utilisateur (cette place est appelée ici ergonomie), plus celle-ci permet une interaction complexe, mais plus elle consomme de ressources attentionnelles

La deuxième est le conflit perceptif, issu des interactions entre réalité virtuelle, réalité physique et environnement virtuel, et donnant lieu à l'expérience utilisateur des cybermalaises, facteur impactant négativement le contrôle des ressources attentionnelles. Ce contrôle, maintien et sélection des ressources attentionnelles est également impacté par l'attention exogène, causée par des stimuli venant de la réalité physique et rendus plus ou moins visibles par l'inhibition (tout comme les cybermalaises), ainsi que par l'attention endogène, c'est-à-dire le choix conscient d'allocation des ressources attentionnelles. S'il le décide, ou si l'inhibition n'est pas suffisante et l'attention

exogène trop forte, l'individu peut ainsi expérimenter des ruptures de présence, qui créent un retour, total ou partiel, dans la réalité physique.

Une fois passé ce filtre attentionnel de l'expérience utilisateur, les ressources disponibles restantes allouées par décision volitionnelle consciente (attention endogène) à l'environnement virtuel font émerger le sentiment de présence. Il convient de préciser que le sentiment de présence correspond ici à la présence spatiale, constitué de ses sous-composants comme le sentiment d'agentivité ou d'incarnation. C'est ici que se joue la relation entre présence et performance. Plus la performance demandée est intégrée à l'environnement virtuelle (par exemple une navigation dans l'environnement), plus les allocations de ressources attentionnelles entre présence et performance seront superposées voire mutuellement nourrissantes, et donc plus les deux mesures seront associées. Au contraire, si la tâche n'est pas intégrée dans l'environnement (par exemple compter à haute voix), alors les allocations de ressources seront différentes, voire opposées. Bien évidemment, ce degré d'intégration de la tâche n'est pas bimodal, il s'agit d'un continuum qui va accentuer ou diminuer l'angle des vecteurs entre présence et performance, l'angle φ . A bien des égards, l'angle φ peut donc être considéré comme le reflet de la dimension écologique d'une évaluation. En effet, plus la tâche est intégrée dans l'environnement, plus cette performance sera associée à la présence d'être dans ce même environnement. Il est également possible de considérer, bien que les résultats empiriques de ce travail ne permettent pas de l'affirmer, que la superposition des allocations de ressources attentionnelles permet à la fois une meilleure présence et une meilleure performance, en éliminant l'aspect double tâche et donc certains processus d'inhibition.

Par la suite, performance et présence vont interagir dans l'environnement virtuel – si l'angle φ permet un certain degré de superposition – pour donner lieu à des boucles sensorimotrices. Ces boucles vont à la fois améliorer l'intégration des informations virtuelles (par exemple le déplacement permettant une meilleure appréhension des distances) ainsi que faciliter l'interaction ergonomique avec l'interface. Il s'agit ici de l'apprentissage : plus l'interaction homme-machine est pratiquée, plus l'ergonomie est connue et adoptée et moins il est nécessaire d'allouer des ressources à cette interface, et ce jusqu'à rendre ces processus quasiment automatiques. De plus, le sentiment de présence, accompagné de l'auto-perception de la performance si celle-ci est écologique, va engendrer de l'engagement (émotionnel et volitionnel) par rapport à l'environnement virtuel. Cet engagement va influencer l'attitude de l'individu et ainsi favoriser l'allocation de ressources attentionnelles envers l'environnement virtuel, créant une boucle vertueuse non pas sensorimotrice mais motivationnelle et attentionnelle.

Enfin, l'ensemble de l'expérience utilisateur confrontée à et en réaction à l'immersion va, à sens inverse, modifier le profil cognitif pour clore la boucle globale de l'interaction homme-machine. En effet, il faut comprendre que la distinction entre les deux principales composantes psychologiques (profil cognitif et expérience utilisateur) est purement conceptuelle, et la frontière tout à fait perméable, comme le montrent les flèches à double sens. Ce sont d'ailleurs les échanges dynamiques et perpétuels entre les deux qui vont forger l'un et l'autre : une faible expérience vidéoludique provoquera en réalité virtuelle davantage de cybermalaises qui, s'ils sont répétés, vont provoquer des mécanismes de repondération de l'intégration multisensorielle (par exemple une diminution de la dépendance au champ) et une habitude qui in fine diminueront la sensibilité future à ces effets négatifs. Enfin, il est important de noter que les facteurs considérés et étudiés dans le cadre de ce travail ne constituent pas ces composantes de façon exhaustive mais qu'ils n'en sont que certains des vecteurs, et que de nombreuses autres peuvent être suggérées, ce modèle ne demandant qu'à évoluer au gré des expérimentations et des discussions.

6.1.2. Equations symboliques

Au-delà de l'exploration et de la lecture visuelle, il est possible grâce à ce modèle conceptuel de rendre compte de certaines variables, de leurs modalités et leurs effets sous la forme d'équations, à la manière de Draper et al., (1998). Pour l'exercice, nous partirons donc des travaux de ces derniers, eux-mêmes appuyés par ceux de Navon & Gopher, (1979) sur l'économie des ressources attentionnelles. Afin de clarifier le raisonnement, le terme seul de « présence » sera utilisé, bien qu'il faille comprendre qu'il s'agit du sentiment de présence en réalité virtuelle. Considérons donc, comme le font les auteurs, la performance p_x comme le produit des ressources i du bassin attentionnel alloué à la tâche r_i et l'efficacité de ces ressources comme e_i . Ainsi, pour Navon & Gopher (1979) tout comme pour Draper et al. (1998) :

$$p_x = r_i e_i$$

En allant plus loin, les auteurs de Draper et al. (1998) imaginent un ensemble n de bassins de ressources attentionnelles r_i , avec chaque élément représentant les ressources disponibles pour un processus isolé. Ensuite, ils définissent un ensemble n de ressources attentionnelles t_i comme représentant les ressources de chaque bassin i allouées au traitement d'informations pertinentes pour la tâche et issues de l'environnement virtuel. Au contraire, d_i représente les ressources allouées au traitement de distracteurs (informations non pertinentes pour la tâche) issus de l'envi-

ronnement virtuel. Enfin, l_i représente les ressources allouées au traitement d'information pertinentes pour la tâche mais issus de la réalité physique, et m_i les ressources destinées au traitement de distracteurs situées dans la réalité physique. Ainsi, pour les auteurs:

$$\text{Présence} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i + d_i}{r_i}$$

Et :

$$p_x = \sum_{i=1}^n ((t_i + l_i) \cdot e_i)$$

Ce qui revient à considérer le sentiment de présence comme le ratio de ressources allouées à l'environnement virtuel par rapport au total de ressources attentionnelles. Avant d'aller plus loin, il est important de noter que pour Draper et al., (1998), les bassins de ressources attentionnelles ne sont pas tous aussi pertinents pour engendrer le sentiment de présence. Ainsi, à la manière du coefficient e_i représentant l'efficacité des bassins de ressources attentionnelles envers la tâche, les auteurs considèrent un coefficient α_i permettant de décrire la puissance relative de chaque bassin pour faire émerger le sentiment de présence. Ainsi :

$$\text{Présence} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i + d_i}{r_i} \cdot \alpha_i \right)$$

Il convient de noter que cette affirmation peut sembler quelque peu minimaliste en ce qu'elle ne prend pas en compte les ressources attentionnelles allouées à l'interface, ou du moins à sa conséquence phénoménologique, l'ergonomie. Il est cependant difficile de considérer que l'attention portée à l'interface, même si cette dernière est supportée par l'environnement virtuel, permet réellement l'émergence du sentiment de présence. Même si des études supplémentaires sont nécessaires, lorsque l'on considère la définition canonique de la présence comme l'illusion de non-médiation, il semble bien que plus l'interface disparaît, plus le sujet est présent : c'est bien l'allocation de ressources dépassant l'interface qui engendre le sentiment de présence, pas celles qui lui sont allouées directement. De la même façon, cette affirmation ne prend pas en compte les ressources allouées à la résolution ou à l'inhibition des cybermalaises, dont la cause, les conflits perceptifs, sont pourtant causés par une allocation de ressources vers l'environnement virtuel. Il

est en effet connu que la double-tâche, notamment l'inhibition, nécessite une allocation de ressources attentionnelles (Conway & Engle, 1994; Engle et al., 1995). Cette allocation de ressources à l'inhibition de symptômes négatifs peut également être prise en compte concernant les stimulations et perturbations du monde physique. Bien qu'il existe probablement d'autres facteurs à considérer, l'ergonomie et les cybermalaises peuvent également être représentés sous cette forme. Il est d'ailleurs fort probable que c'est à ce genre de bassins attentionnels modulateurs que pensaient Draper et al., (1998) en incorporant le coefficient α_i . Nous considérons ici que ce coefficient est directement issu de la confrontation entre profil cognitif de l'individu et facteurs systèmes. L'ensemble des ressources attentionnelles allouées à la résolution ou à l'inhibition des cybermalaises peut ainsi être trouvé en considérant l'interaction entre les facteurs humains h_i (les prédispositions et susceptibilités aux cybermalaises) et l'impact sur les ressources attentionnelles du conflit perceptif c_i issu des facteurs systèmes s :

$$\text{Cybermalaises} = h_i s_{ci}$$

Ce qui revient à considérer l'impact attentionnel des cybermalaises comme le résultat de l'interaction entre facteurs humains et facteurs systèmes associés à l'apparition et la résolution du conflit perceptif. De la même façon, il est possible de déterminer l'impact attentionnel de l'ergonomie en considérant l'interaction entre les facteurs humains h_i modulés par l'impact de la complexité de l'interface sur les ressources attentionnelles u_i issue des facteurs systèmes s de cette façon :

$$\text{Ergonomie} = h_i s_{ui}$$

Ce qui revient à considérer l'impact attentionnel de l'ergonomie comme le résultat de l'interaction entre facteurs humains et facteurs systèmes associés à l'interfaçage homme-machine. A la suite de ces deux équations, il est possible d'argumenter que le coefficient α_i correspond au produit de l'ensemble des impacts attentionnels h_i et s_i . Nous proposons donc cette nouvelle équation du sentiment de présence permettant d'explorer un peu plus profondément le coefficient immersif des ressources attentionnelles, tout en rendant compte de la spécificité des facteurs humains de l'individu tout comme des facteurs systèmes de la réalité virtuelle :

$$\text{Présence} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i + d_i}{r_i} \cdot (h_i s_i) \right)$$

Il peut cependant sembler superflu de considérer le sentiment de présence par rapport à la performance en additionnant les bassins pertinents pour la tâche et issus de l'environnement virtuel (t_i) et distracteurs issus de l'environnement virtuel (d_i). Il est en effet plus autosuffisant et simple de considérer le sentiment de présence comme le ratio entre l'ensemble des bassins de ressources attentionnelles attribués à l'environnement virtuel par rapport à l'ensemble des ressources attentionnelles disponibles et modulées par l'interaction entre facteurs humains et facteurs systèmes. Cet ensemble, appelé v_i permet de donner :

$$\text{Présence} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i}{r_i} \cdot (h_i s_i) \right)$$

Il est tout à fait possible d'argumenter que la performance en réalité virtuelle est, tout comme le sentiment de présence, négativement impactée par certaines interactions entre facteurs humains et facteurs systèmes, comme les cybermalaises. Cependant, ces coefficients peuvent être considérés comme englobés dans l_i , l'ensemble des bassins de ressources attentionnelles allouées à des processus non pertinents pour la tâche. Il est toutefois nécessaire de considérer le fait que cette performance se situe sur un continuum entre tout à fait intégrée à l'environnement virtuel et tout à fait détachée de l'environnement virtuel. Afin de résoudre le problème de l'intégration de la tâche, Draper et al., (1998) ont indifférencié performance virtuelle et performance physique, en considérant simplement l'ensemble des processus pertinents pour la tâche ainsi que l'ensemble des distracteurs. En effet, selon les équations présentées précédemment, les bassins de ressources attentionnelles alloués au sentiment de présence et à la performance diffèrent par deux aspects : d_i , les informations virtuelles porteuses de présence mais non pertinentes pour la tâche, et l_i , les informations physiques pertinentes pour la tâche mais non intégrées dans l'environnement virtuel. Ces deux types d'informations étant largement associés au niveau d'intégration de la tâche dans l'environnement virtuel, nous défendons ici que ces deux bassins peuvent être considérés comme dépendants de l'angle φ . Puisque φ correspond à l'angle entre deux vecteurs de ressources attentionnelles de sens, d'origine et direction communs (présence, performance), sa valeur maximale est 180° et sa valeur minimale est 0° . Puisque cet angle compare la relation entre les deux vecteurs de ressources attentionnelles représentés par des mesures quantifiables que sont le sentiment de présence et la performance, il est imaginable de relier ces valeurs abstraites à des analyses statistiques, par exemple le coefficient de corrélation r de Pearson :

$$\varphi = \left(1 - r_{(\text{Présence}, \text{Performance})} \right) \cdot 90$$

Ainsi, un r de Pearson équivalent à -1 révélant une corrélation totale négative correspond à un angle φ de 180° degrés et donc à des facteurs présence et performance tout à fait opposés. Au contraire, un r de Pearson équivalent à 1 révélant une association parfaite correspond à un angle φ de 0° et donc une superposition parfaite des vecteur présence et performance. Si l'on considère la finitude des ressources attentionnelles, alors il faut considérer qu'à partir du moment où l'angle φ dépasse 90° , les deux vecteurs sont de sens opposés et nuisent l'un à l'autre. Pour reprendre les équations précédentes, cela correspond à une performance nécessitant de nombreux bassins de ressources attentionnelles hors de l'environnement virtuel, ou à une abondance de distracteurs virtuels. Il s'agit également, si le coefficient de Pearson est utilisé pour évaluer l'association statistique, d'un r négatif. Il convient de considérer que dans ce cas empiriquement rare – les corrélations de la littérature étant généralement positives ou nulles (Cooper et al., 2018; Draper et al., 1998; Grassini et al., 2020; Nash et al., 2000; Pausch et al., 1997; Sadowski & Stanney, 2002; J. A. Stevens & Kincaid, 2015; Witmer & Singer, 1994; Youngblut & Huie, 2003) – l'allocation de ressources attentionnelles à la performance nuit à la présence, et vice-versa. S'il est facile d'imaginer une telle tâche hors de la réalité virtuelle, par exemple celle similaire à celle de Slater et al., (1995) qui consisterait à demander au participant de pointer du doigt, en permanence et parallèlement à une visite virtuelle, la provenance d'un son issu de la réalité physique, il est plus complexe d'imaginer une telle tâche au sein de la réalité virtuelle : même en offrant au participant la possibilité de faire disparaître l'environnement virtuel dans le lequel il se situe, il est possible que cette interaction engendre de la présence, au moins jusqu'à un certain point à partir duquel le participant pourrait tout de même se sentir présent dans un espace numérique vide. Des études supplémentaires sont nécessaires pour trancher sur la possibilité de cette affirmation théorique.

Considérons à présent le fait que les ressources attentionnelles allouées au sentiment de présence et à la performance sont représentées ici sous forme de vecteur. L'origine commune de ces deux vecteurs est déjà connue : le contrôle de l'attention et des ressources attentionnelles, comme représenté graphiquement sur le schéma du modèle (Figure 25). Leurs sens et leurs directions sont également connus et indiqués par l'angle φ . Leurs normes (longueurs) peuvent être considérées par les définitions données précédemment de la présence et de la performance et correspondant à leur intensité ou force : plus la norme du vecteur sentiment de présence est élevée, plus le participant se sent présent dans l'environnement virtuel. Cette norme est modulée, comme nous l'avons vu, non seulement par l'efficacité des ressources attentionnelles, mais également par l'interaction entre les facteurs humains et facteurs systèmes. Il serait également possible, à partir de ces deux vecteurs de considérer le fait que la réalisation d'une performance écologique augmente le sentiment de présence (et vice-versa), par exemple afin de rendre

compte de l'engagement ou des boucles sensorimotrices. Pour ce faire, il suffirait d'incorporer l'angle φ dans la définition de la norme du sentiment de présence et de la performance. Toutefois, il est plus simple de considérer cette intégration comme déjà présente dans la définition même des deux composantes : les boucles sensorimotrices comme l'engagement ne font qu'augmenter (en qualité ou en nombre) les ressources allouées à l'environnement et à la tâche. Enfin, ces représentations symboliques permettent de définir une ultime équation, la dimension écologique individuelle de l'expérience virtuelle (une fois les données standardisées) :

$$\text{Dimension écologique} = \frac{\text{Présence} + \text{Performance}}{\varphi}$$

S'il est en effet nécessaire que la tâche soit intégrée dans l'environnement virtuel pour que le participant expérimente une performance écologique, il est également nécessaire que celui-ci ressente à la fois un sentiment de présence suffisant mais également de performance. Pour reprendre la dénomination sous forme de vecteurs, s'il est primordial que ces deux vecteurs partagent des similarités de sens et de direction (φ), il est également important que leurs normes soient élevées et, idéalement, homogènes. Evidemment dans le cas empiriquement impossible d'un angle φ de 0, il conviendra, au-delà de l'impossibilité mathématique, de considérer que la dimension écologique absolue a été atteinte.

6.1.3. Esquisse algorithmique

Lorsque l'on considère le modèle de l'angle φ on voit qu'il semble possible, en connaissant les valeurs de certaines variables, notamment celles des facteurs systèmes et des facteurs humains, de faire des estimations de l'expérience utilisateur. Un algorithme prédictif permettrait à la fois de comparer les différents environnements, mais aussi de distinguer à l'avance les individus qui profiteront le plus de la réalité virtuelle, que ce soit pour de l'entraînement (par exemple pour choisir entre une méthode d'apprentissage en réalité virtuelle ou une méthode plus classique) ou pour une normalisation a posteriori (par exemple lors d'un diagnostic). Nous proposons donc dans le tableau suivant un ensemble de méthodes permettant de déterminer à la fois les facteurs systèmes et les facteurs humains et ainsi tenter de prédire l'expérience utilisateur.

Composants	ab.	Description et coefficient :	1	2	3	4
Qualité du système	e	Fréquence rafraîchissement	< 30 Hz	< 60 Hz	< 90Hz	≥ 90 Hz
		Nombre d'images par seconde	< 20	< 40	< 60	≥ 60

		Suivi	Aucun	Tête	Tête et membres supérieurs	Tête et membres supérieurs et inférieurs
		Résolution par œil	$\leq 640 \times 800$	$\leq 1080 \times 1200$	$\leq 1440 \times 1700$	$> 1440 \times 1700$
		Angle de vue	$\leq 60^\circ$	$> 60^\circ$	$> 80^\circ$	$> 100^\circ$
		Délai système	≥ 200 ms	< 200 ms	< 100 ms	< 50 ms
		Poids du système (HMD uniquement)	> 1.500 g	> 1.000 g	> 500 g	≤ 500 g
		Représentation du corps	Presque nulle	Légère	Bonne	Totale
		Stéréoscopie	Non			Oui
		Ratio distance par rapport au point de référence stéréoscopique / distance par rapport à l'écran (uniquement si stéréoscopie)	≥ 0.15	< 0.15	< 0.1	< 0.05
		Capacités englobantes	Presque nulles	Légères	Bonnes	Totales
Qualité de l'environnement virtuel	v	m (Réalisme QEP)	< 15	< 25	< 35	≥ 35
		m (Audio QEP)	< 1.75	< 3.5	< 5.25	≥ 5.25
		m (Haptique QEP)	< 1.75	< 3.5	< 5.25	≥ 5.25
		Perturbations extérieures	Grandes	Modérées	Faibles	Presque nulles
		m (Possibilité d'agir QEP)	< 2	< 3.5	< 5.25	≥ 5.25
		Nombre de modalités sensorielles	1.00	2.00	3.00	≥ 3
		Intégration de la tâche ϕ : corrélation de Pearson (Présence, Performance)	$r < .1$	$r > .1$	$r > .2$	$r \geq .3$
		Intégration de la tâche : (si la performance n'est pas connue)	Presque nulle	Légère	Bonne	Totale
		Audio	Mono	Stéréo	Stéréo spatialisé, 5.1	7.1, binaural
Qualité de l'interface	q	m (Qualité de l'interface QEP)	< 1.75	< 3.5	< 5.25	≥ 5.25
		m (Possibilité d'examiner QEP)	< 1.75	< 3.5	< 5.25	≥ 5.25
		m (Auto-évaluation de la performance QEP)	< 1.75	< 3.5	< 5.25	≥ 5.25
Capacités cinéto-gènes du système	c	Position du participant		Debout	Assis	
		Cadre de référence visible	Non	Faible	Modéré	Grand
		Durée d'immersion ininterrompue	≥ 60 minutes	< 60 minutes	< 40 minutes	< 20 minutes
		Horizon ou fond visible	Non	Faible	Modéré	Grand
		Score Questionnaire sur les Cybermalaises	≥ 10	< 8	< 6	< 4
		Pourcentage d'individus quittant l'expérimentation	≥ 6 %	< 6 %	< 3 %	< 1 %
		Flux visuel	Fort	Modéré	Léger	Presque nul

Expérience vidéoludique	<i>j</i>	Fréquence de jeux vidéo (heures / semaine)	< 1	< 3.5	< 7	≥ 7
		Fréquence de réalité virtuelle (heures / mois)	< 1	< 3.5	< 7	≥ 7
		Fréquence visionnage films 3D (heures / mois)	< 1	< 3.5	< 7	≥ 7
		Pratique sur ordinateurs ou consoles de jeux	Très rarement	Rarement	Souvent	Très souvent
		Pratique à domicile	Très rarement	Rarement	Souvent	Très souvent
		Pratique de jeux intensifs	Très rarement	Rarement	Souvent	Très souvent
		Score Jeux QPI	< 5	< 10	< 15	≥ 15
Propension aux cinétoses	<i>k</i>	Score au QCMT	≥ 15	< 15	< 10	< 5
		Score au TBC	≥ 10	< 8	< 5,5	< 3
Propension à l'immersion	<i>i</i>	Score Implication QPI	< 9	< 18	< 27	≥ 27
		Score Focus QPI	< 9	< 18	< 27	≥ 27
		Score Emotions QPI	< 7	< 14	< 21	≥ 21
		Note standardisée au test de Stroop	≤ -1 ET	> -1 ET	> 0 ET	> 1 ET
		Note standardisée au d2-R	≤ -1 ET	> -1 ET	> 0 ET	> 1 ET
		Score au TFE	≤ 4.5	< 9	< 13.5	≥ 13.5
		Forme physique et mentale contextuelle	Mauvaise	Plutôt mauvaise	Plutôt bonne	Bonne
Valeurs interprétatives :			Problématique	Plutôt inadapté	Adapté	Optimal
Facteurs systèmes	<i>w</i>	$m(e, v, q, c)$	≤ 1	≤ 2	≤ 3	> 3
Profil cognitif	<i>z</i>	$m(j, k, i)$	≤ 1	≤ 2	≤ 3	> 3
Cybermalaises	<i>s</i>	$m(j, k) * m(e, c)$	≤ 4	≤ 8	≤ 12	> 12
Ergonomie	<i>u</i>	$(j) * (q)$	≤ 4	≤ 8	≤ 12	> 12
Sentiment de présence	<i>p</i>	$m(j, i) * m(e, v)$	≤ 4	≤ 8	≤ 12	> 12
Expérience utilisateur	<i>w</i>	$s + u + p$	≤ 12	≤ 24	≤ 36	> 36

Tableau 8. – Esquisse d'algorithme permettant de prédire l'expérience utilisateur en réalité virtuelle à partir des facteurs humains et des facteurs systèmes connus tel qu'utilisé pour la réalisation du logiciel Maneuvrier (2020b). QEP = Questionnaire sur l'Etat de Présence, QPI = Questionnaire sur la Propension à la Présence, QCMT = Questionnaire court sur le Mal des Transports, TBC = Test de la Baguette et du Cadre, TFE = Test des Figures Enchevêtrées, $m(x, y)$ = moyenne de x et y, ET = Ecart-type.

Le Tableau 8 propose donc une liste d'items permettant d'attribuer des coefficients et d'ainsi former des composantes formant elles-mêmes d'un côté les facteurs systèmes et de l'autre le profil

cognitif. L'utilisation de moyennes fait que ces items ne sont pas tous nécessaires si certaines données ne sont pas connues, comme le montre l'item intégration de la tâche dans l'environnement virtuel qui peut être appréhendé soit par le coefficient r de Pearson entre présence et performance, soit comme une mesure subjective. L'avantage de cette méthode est que certaines données manquantes ne sont pas problématiques, l'inconvénient est qu'il devient possible de choisir les items afin d'en sélectionner les plus avantageux selon l'environnement virtuel utilisé. Un calcul de fiabilité basé sur le nombre d'items et le choix des items entrant en compte est ainsi nécessaire (par exemple un ratio entre le nombre d'items utilisés et nombre d'items total, avec un minimum d'items par composante). Les composantes ainsi formées par ces items vont ensuite interagir pour former les composantes d'interaction formant l'expérience utilisateur dans le modèle de l'angle φ (cybermalaises, ergonomie, sentiment de présence). La valeur de la variable finale expérience utilisateur illustre ainsi l'interaction globale entre facteurs systèmes et facteurs humains : plus cette variable est élevée, moins le sujet sera sensible aux cybermalaises, plus il apprendra rapidement à utiliser l'interface, plus il sera présent et donc plus il aura de ressources attentionnelles disponibles pour la tâche en réalité virtuelle. Des valeurs interprétatives sont données pour la lecture de ces nouvelles composantes. Il est nécessaire de préciser que ces scores seuls ne permettent pas de prédire la performance qui sera largement modulée par l'attention endogène du sujet ainsi que par ses habiletés cognitives et sensori-motrices à la tâche. Rappelons cependant que présence et cybermalaises ont permis lors d'une tâche virtuelle présentant un angle φ modéré de prédire jusqu'à 25% de la variance de performance à un test de cognition spatiale. Il convient également de préciser que si l'évaluation porte sur une tâche tout à fait séparée de l'environnement virtuel, alors l'expérience utilisateur ne saura prédire cette performance.

Bien évidemment, il est possible d'ajouter à ces valeurs prédictives des calculs post-hoc, par exemple la dimension écologique individuelle dont la formule est donnée dans la partie précédente. Il est donc possible d'imaginer un logiciel avec interface graphique où l'utilisateur inscrit les valeurs connues et les valeurs recherchées, ainsi que de potentielles normes. Une version alpha de ce logiciel est proposée par l'auteur sur le site Maneuvrier (2020) et peut être téléchargée gratuitement. Il convient de noter que l'utilisation de coefficients de 1 à 4 points par item facilite la création algorithmique ainsi que sa visualisation, mais ne permet pas de rendre bien compte de toutes les variations possibles, en plus d'intégrer une forte dimension subjective. Aussi, s'il y a développement futur d'un tel logiciel, il serait préférable, au possible, d'utiliser des données continues. Un tel programme informatique pourrait ainsi offrir différentes possibilités : évaluer la puissance immersive d'un système et d'un environnement, évaluer la réaction a priori d'un individu à ce système, ou encore normaliser des données. De plus, il est envisageable qu'un tel programme

se nourrisse par apprentissage automatique des données proposées afin de pouvoir suppléer à des données manquantes : les algorithmes de forêts aléatoires semblent particulièrement pertinents pour rendre compte de ce modèle (Ho, 1995). Un tel logiciel de *machine learning* nécessiterait de nombreuses données mais permettrait également une prédiction forte des différentes composantes de la réalité virtuelle décrites dans ce travail : facteurs humains, facteurs systèmes, expérience utilisateur. De plus, un tel modèle généralisé et généralisable à grande échelle pourrait permettre une fiabilité méthodologique en normalisant et comparant les environnements virtuels et leurs dimensions écologiques lors des études scientifiques. Dans tous les cas, il est primordial de rappeler que ce modèle pragmatique est une conception préliminaire demandant amélioration et confirmation, tout comme l'est le modèle théorique de l'angle φ qui l'a inspiré. La liste des éléments, si elle peut sembler longue, est en réalité bien courte dès lors qu'il manque certaines données et qu'il s'agit de réaliser des modélisations de qualité. De plus, celle-ci n'est ni exhaustive, ni figée : des études supplémentaires utilisant des techniques de factorisation sont nécessaires pour supprimer des éléments peu informatifs ou rendre indispensables la mesure d'autres éléments, ainsi qu'affiner l'indice de stabilité. De plus, il convient de noter que ce programme théorique, s'il s'appuie sur des données empiriques, n'a pas été testé.

Enfin, il convient de détailler certaines composantes. Si certaines sont plutôt évidentes et bien inscrites dans la littérature de la réalité virtuelle (notamment la première, représentant la qualité du système immersif et étroitement lié au matériel utilisé), d'autres sont légèrement plus inédites et issues des résultats de ce travail, par exemple l'expérience vidéoludique, la séparation des sous-échelles du Questionnaire sur l'Etat de Présence, ou encore la distance par rapport au point de référence stéréoscopique (normalisé par rapport à la distance par rapport à l'écran). Concernant les facteurs systèmes, les items les composant sont généralement de deux types : soit il s'agit de caractéristiques objectives du système (par exemple le taux de rafraîchissement) soit il s'agit de l'observation subjective de leurs conséquences. La composante qualité de l'interface est par exemple exclusivement construite sur la moyenne des scores au Questionnaire de Présence sur certaines sous-échelles. Evidemment, cette variable nécessite une étude préliminaire de l'environnement virtuel, ce qui est assez peu pratique. Cependant, puisque l'on peut s'attendre à une standardisation des évaluations virtuelles dans le futur, il n'est pas impensable de constituer des normes des environnements et de leurs composantes, même s'il serait évidemment pertinent de pouvoir ajouter des caractéristiques plus objectives. Concernant les facteurs individuels, ces derniers nécessitent principalement des questions fermées sur l'expérience vidéoludique ou la propension à la présence, ce à quoi viennent s'ajouter des évaluations plus ou moins expérimentales comme la dépendance à l'égard du champ ou le d2-R ou le test de Stroop. Ces deux tests, dont

les processus évalués sont étroitement liés à l'expérience utilisateur en réalité virtuelle le premier évaluant l'attention et le deuxième l'inhibition (Ross, 2005; Scarpina & Tagini, 2017), sont de nature complémentaire et sont loin d'être indispensables ; ils sont principalement inscrits afin de révéler qu'il existe une potentielle infinité de façons d'évaluer le profil cognitif, et que la principale problématique est d'en trouver les plus sensibles, valides et fidèles.

6.1.4. Discussion et conclusion

Le modèle de l'angle φ ainsi que les équations symboliques et l'esquisse d'algorithme prédictif, tous trois largement ancrés dans les théories de l'économie de l'attention Navon & Gopher, (1977), permettent une meilleure visualisation mais aussi une meilleure compréhension des mécanismes en œuvre en réalité virtuelle, et notamment des liens entre sentiment de présence et performance. Associés à des normalisations de tests et d'environnements ou encore à l'exploration automatique de l'évaluation de la présence par apprentissage automatique (Ochs et al., 2018), ces modèles devraient permettre de profondes avancées dans le domaine. Il convient cependant de noter à nouveau que ces modèles ne sont ni exhaustifs, puisque les facteurs humains et systèmes présentés ici ne sont que les manifestations directes d'ensembles plus larges, ni figés, puisqu'ils ne demandent qu'à évoluer au gré des expérimentations empiriques ou des discussions théoriques. Des études sur l'angle φ sont en effet nécessaires pour investiguer plus avant sa pertinence, par exemple sur des tâches présentant des angles très élevés et / ou très faibles, ou sur des tâches dont l'angle φ varie au fur et à mesure de l'évaluation, même si ceci nécessiterait une évaluation continue du sentiment de présence. La question primordiale concernant ce modèle est celle de son économie, au sens de l'étude de la nature des échanges dynamiques et procéduraux entre les différentes composantes.

En effet, le lecteur avisé aura tôt fait, au vu des discussions théoriques précédentes, de reconnaître que ce modèle s'inscrit en grande partie dans le cadre des théories représentationnelles et computationnelles. Pour cause, la représentation du modèle par composantes dont l'économie est indiquée par des flèches laisse entendre un aspect procédural : il y a d'un côté des facteurs humains qui vont former un profil cognitif, puis un profil cognitif qui va interagir avec la machine pour à nouveau impacter les facteurs humains et ainsi clore la boucle. Cette économie, sous forme de boucles cognitivo-sensorimotrices, est courante au sein des modèles attentionnels, mais surtout, plus largement, des modèles représentationnels et computationnels. Il est possible d'aller plus loin et de considérer que la démarche même de l'utilisation de modèles s'inscrit, au moins en partie, dans des courants de pensée cognitivistes computationnels, puisqu'il s'agit de créer une représentation abstraite du monde physique. Il est effectivement tout à fait juste de considérer

le modèle de l'angle φ comme inscrit dans les théories cognitivistes classiques : il y a une entrée (interaction homme-machine à partir du profil cognitif), un traitement (expérience utilisateur), et une sortie (performance et présence puis modulation du profil cognitif). Ce choix ne signifie pas pour autant une prise de partie quant à la pertinence d'une théorie par rapport à une autre pour rendre compte des processus de la réalité virtuelle. Ce choix est principalement dirigé par un aspect pragmatique : la conception d'un modèle, notamment sous forme de schéma, est en effet largement simplifiée par le cadre computationnel pour lequel il existe un séquençage de l'information. Le but d'un modèle étant de permettre une appréhension et une compréhension des processus en jeu au sein d'un système particulier, cette conception sous forme de schéma laissant sous-entendre un aspect procédural a été choisie.

Il convient cependant de relativiser ce choix. En effet, ce modèle a été conçu afin de permettre une lecture double. La première, la lecture cognitiviste classique, correspond à lire le schéma à l'instar des théories classiques de Shannon (1948) ou de Broadbent (1958) : de façon procédurale. Ici, il s'agit de lire de haut en bas puis de bas en haut afin de former une boucle sensori-cognitivo-motrice entre le sujet et son environnement dont la séparation dualiste est illustrée graphiquement : il existe une réalité physique avec laquelle le sujet va interagir. Cette lecture n'est, rappelons-le, pas erronée. Aussi, pour aller plus loin dans ce cadre théorique, il serait tout à fait possible de remplacer « intégrations cognitives et sensorimotrices » par « modèle interne » ou même « représentation de l'environnement virtuel » sans changer la nature du modèle. Cependant, si le terme plus neutre d'intégration a été choisi, c'est dans le but de permettre une deuxième lecture davantage écologique, et plus particulièrement, constitutive. En effet, cette perception constitutive des différentes composantes est déjà présente dans l'intitulé du profil cognitif : celui-ci comprend en effet l'ensemble des méthodes de « perception », de « traitement » et de « sortie » de l'information d'un individu. Dans un cadre représentationnel, il serait plus pertinent (et encore une fois, tout aussi juste) de parler de profil « sensori-cognitivo-moteur », puisque l'économie entre ces trois systèmes y est considérée comme causale : le système perceptif reçoit l'information, le système cognitif le traite, et le système moteur exécute ce traitement. Ici, à la manière des théories écologiques, cet ensemble peut tout aussi bien être considéré comme un seul système constitutif. Tout comme il est possible de lire sur ce modèle une séparation dualiste entre sujet et environnement, il est possible de lire une expérience entièrement basée sur l'interaction entre les deux. Il suffira, pour un lecteur partisan des théories énaclivistes, d'agrandir l'expérience utilisateur à l'ensemble de la « réalité physique » pour les faire pleinement se superposer, ainsi que la renommer « environnement ». Similairement, et pour s'accorder avec ce cadre

théorique, les « intégrations sensori-cognitivo-motrices » seront remplacées par « extraction d'affordances », principale méthode de perception chez l'animal et issue de son interaction avec l'environnement (J.-J. Gibson, 1977, 1979). De la même façon, un lecteur écologique pourra à sa guise considérer les flèches doubles (considérées dans un cadre computationnel comme un échange mutuel d'informations) comme des composantes constitutives, par exemple entre l'extraction d'affordances et le sentiment de présence, entre le profil cognitif et les facteurs humains, ou encore entre le profil cognitif et l'expérience utilisateur. Dans ce cadre constitutif et écologique, l'angle φ correspond au niveau d'intégration dans l'environnement virtuel des affordances perçues et exécutées. Si ces affordances sont issues de façon dominante de l'interaction avec l'environnement virtuel, alors la place du sujet sera considérée à partir de celui-ci, et il se sentira présent, au sens d'être-au-monde (Dreyfus, 1991; Zahorik & Jenison, 1998), dans cet environnement virtuel. Au contraire, si les affordances perçues sont issues de l'interaction avec l'environnement non virtuel, alors ce sentiment de présence émergera au sein de cette interaction. L'angle φ servant donc, dans ce cadre, à mesurer l'écart entre les affordances globales perçues par l'animal et le comportement qui lui est demandé. Il convient toutefois de noter que le concept de ressources attentionnelles, largement inscrit lui-même dans le cadre computationnel, est généralement peu utilisé dans les théories écologiques. Il est cependant difficile de savoir si cela est dû à une incompatibilité entre les cadres théoriques ou un simple manque d'étude sur la question. En conclusion, bien que les concepts abordés dans ce modèle le tirent vers les théories computationnelles et puisque nous considérons que la confrontation des deux points de vue est pertinente et bénéfique pour le domaine, nous laissons au lecteur le choix de l'ancrage théorique du modèle de l'angle φ .

6.2. Recommandations méthodologiques

Les discussions théoriques et les résultats empiriques de ce travail permettent de présenter une série de recommandations méthodologiques concernant l'utilisation de la réalité virtuelle, principalement à des fins d'investigation du comportement humain. La première, la plus générale et répétée à plusieurs reprises au sein des différentes expérimentations, est bien évidemment de ne pas considérer la réalité virtuelle comme une simple transposition numérique de la réalité. S'il est possible d'argumenter qu'une passation sur écran d'ordinateur d'un Wisconsin Card Sorting Test à l'aide de la souris n'est pas profondément différente d'une passation traditionnelle papier-crayon (et encore, l'absence du regard humain, les différences perceptivo-motrices ainsi que la présence directe de l'expérimentateur seraient des composantes à évaluer), ce n'est pas le cas pour une implémentation immersive et écologique en réalité virtuelle, où sentiment de présence, interface, cybermalaises et autres facteurs décrits précédemment entrent en jeu pour moduler la performance. Une fois ce postulat accepté, des recommandations peuvent être suggérées pour limiter les biais inhérents à cet outil et favoriser ses atouts, et ce durant les trois phases de son élaboration et exécution. Mais avant cela, une rapide discussion permettant de considérer les facteurs humains de la réalité virtuelle d'un point de vue méthodologique est nécessaire.

6.2.1. Facteurs humains et biais expérimentaux

6.2.1.1. Présence et dimension écologique

La question principale à l'issue de ce travail est de savoir s'il faut considérer le sentiment de présence comme un biais expérimental ou au contraire comme un atout écologique. En effet, nous avons vu que le sentiment de présence est généralement un prédicteur de la performance en réalité virtuelle. Or, puisque les individus semblent présenter des niveaux de présence relativement hétérogènes, il peut sembler pertinent de considérer le sentiment de présence comme un biais expérimental à contrôler. Cette problématique est complexe, et ceci par de nombreux aspects. Un raisonnement par l'absurde peut cependant apporter certaines lumières. Ce raisonnement constituerait, en partant du principe que la présence est un biais à neutraliser, à considérer qu'une expérimentation pour laquelle le sentiment de présence n'impacte pas la performance, à l'instar de Neuroprésence avec le Wisconsin Card Sorting Test, serait l'idéal du cadre expérimental. En allant plus loin, il serait donc possible d'argumenter que le sentiment de présence est un biais à éviter afin de réaliser des expérimentations méthodologiquement rigoureuses. Le but serait donc de produire des évaluations en réalité virtuelle provoquant le moins de présence possible. Nous voyons donc ici l'impasse de ce raisonnement : le sentiment de présence est indispensable

à la réalisation d'une expérimentation virtuelle, notamment écologique. Et même lorsque performance et présence ne sont pas significativement corrélées, la première ne peut aller sans un minimum de la seconde. Au contraire, une forte intrication entre présence et performance révèle le caractère écologique d'une tâche et d'un environnement, notamment au regard des théories écologiques de la perception discutées dans Spatioprésence ainsi qu'en introduction de ce travail. Cette association forte entre les deux, induite par la réduction de l'angle φ discuté précédemment, devrait donc au contraire être considérée comme l'apogée et le but ultime de l'expérimentation en réalité virtuelle. Une absence d'association entre présence dans l'environnement virtuel et performance ne correspond pas forcément pour autant à un biais expérimental : il s'agit simplement, à l'instar de Neuroprésence, d'une évaluation virtuelle peu écologique et peu intégrée ne tirant pas pleinement profit des capacités de la réalité virtuelle. Il est cependant fondamental d'investiguer si la dimension écologique, dépendante de l'angle φ , permet réellement, et selon les théories, une mesure plus fine et plus précise de la performance évaluée, notamment sur des sujets pathologiques.

Si l'on considère l'association entre présence et performance comme nécessaire et souhaitable, et puisque différents facteurs humains affectent ce sentiment de présence, il est possible de considérer que la réalité virtuelle va, de façon inhérente, favoriser certaines personnes plus que d'autres, par exemple celles ayant une bonne expérience des jeux vidéo. Il pourrait donc sembler pertinent de contrôler et neutraliser le sentiment de présence de chaque individu afin d'observer une performance contrôlée. Le problème ici est celui de l'aspect procédural de la présence : si une meilleure performance induit également une meilleure présence, neutraliser cette dernière ne revient-il pas à neutraliser la performance même ? La question se pose également pour d'autres facteurs, notamment la pratique des jeux vidéo ; s'il peut sembler pertinent de contrôler cette expérience vidéoludique au regard de son effet facilitateur sur le sentiment de présence et donc sur la performance évaluée, si présence et performance sont aussi associées (ce que font penser les théories écologiques), cela ne revient-il pas à neutraliser l'origine même de la performance ? Un exemple non virtuel peut permettre de mieux appréhender cette question. Imaginons que l'on cherche à évaluer la cognition spatiale de deux individus. L'un est professeur de français, l'autre est chauffeur de taxi. Doit-on contrôler l'expérience d'entraînement de cognition spatiale que représente la profession du deuxième pour évaluer sa performance au test ? La réponse est bien évidemment dépendante du but de l'évaluation. Si le but est d'évaluer la performance globale, alors cette mesure n'a aucun intérêt : le chauffeur de taxi montrera probablement une meilleure performance que le professeur, car il entraîne son orientation et sa navigation spatiales plusieurs heures par jour. Cependant, si le but est d'évaluer une performance normative, par exemple dans

une finalité d'observation de la dégradation des processus de cognition spatiale, alors il est absolument fondamental de prendre en compte les nombreuses heures de conduite du chauffeur de taxi. Si la performance de cognition spatiale du professeur se révèle être 5% inférieure à celle des autres professeurs alors il y a peu de chance que celle-ci soit dégradée. Au contraire, si le chauffeur de taxi présente une performance 25% inférieure à celle des autres chauffeurs de taxi, alors il est fort probable qu'il existe une dégradation, même si sa performance objective est au même niveau que celle du professeur de français. C'est le fameux z-score utilisé couramment en psychologie permettant de situer l'individu dans sa norme. Il est donc probablement nécessaire, en réalité virtuelle comme dans d'autres protocoles d'évaluations, de normaliser les performances évaluées. Cependant, les facteurs à prendre en compte sont probablement plus spécifiques à cette technologie, et nous espérons que le présent travail permet d'en souligner certains.

6.2.1.2. Vers une standardisation et normalisation des tests en réalité virtuelle

Nous défendons donc ici le contrôle de certains facteurs humains supplémentaires comme profondément nécessaire lors des évaluations in virtuo, notamment la pratique des jeux vidéo qui a été révélée à de multiples reprises dans cette thèse comme largement impactante en réalité virtuelle, mais aussi d'autres variables, notamment les cybermalaises. Il est bien évidemment nécessaire pour cela, de i) standardiser les tests neuropsychologiques de la réalité virtuelle et ii) réaliser des échantillons et des passations de référence permettant de normaliser les données futures, et notamment d'associer les profils des participants avec d'autres données démographiques traditionnellement intégrées (âge, genre, niveau d'étude...) En effet, il est fortement possible que l'expérience des jeux vidéo, tout comme les cybermalaises, impactent inégalement différentes tâches, rendant difficilement applicable l'élaboration d'un modèle global et généralisable de la réalité virtuelle ne prenant pas en compte les spécificités de la tâche et du système immersif. Il est donc aussi important de contrôler les facteurs humains indépendamment de leurs interactions avec les facteurs systèmes, comme le montrent les coefficients de modulation des équations symboliques. Il peut enfin être argumenté que la mesure de ces variables est infinie, et que de nombreux autres facteurs peuvent influencer cette performance à normaliser. Il est en effet possible, pour reprendre l'exemple du chauffeur de taxi, que le professeur de français passe la majeure partie de son temps libre à faire de la course d'orientation, rendant obsolète sa norme de performance au test de cognition spatiale définie par son profil socio-culturel, mais aussi plus difficile la détection de la détérioration des processus cognitifs concernés. Il n'existe pas de réponse à ce problème, en dehors de l'évaluation qualitative et personnalisée, largement plus coûteuse. En conclusion, il semble réellement nécessaire d'incorporer certains nouveaux facteurs

lors de la normalisation d'évaluation en réalité virtuelle, principalement le profil cognitif (expérience vidéoludique, sensibilité aux cinétoses, dépendance au champ, propension à la présence) et l'expérience utilisateur (sentiment de présence, manifestation des symptômes négatifs), mais aussi des facteurs systèmes (intégration de la tâche dans l'environnement ou angle φ , qualité globale de l'interface et du contenu, propension cinétogène de l'interaction homme-machine). Il est en effet inutile de chercher à normaliser les caractéristiques individuelles si chaque passation est réalisée sur du matériel et logiciel immersif différent.

6.2.2. La réalité virtuelle expérimentale

6.2.2.1. Phase de conception de l'expérimentation

Comme nous l'avons vu, l'expérience utilisateur influençant la performance est la conséquence de l'interaction entre facteurs humains (profil cognitif) et facteurs systèmes (la technologie immersive utilisée). Il convient donc, lors de la conception de l'étude et de l'environnement virtuel, de i) maximiser la relation entre présence et performance et donc la qualité écologique de cette dernière en l'intégrant au maximum dans l'environnement virtuel et ainsi réduire l'angle φ ii) maximiser les possibilités d'émergence du sentiment de présence et iii) réduire l'impact négatif des facteurs humains et systèmes, notamment les cybermalaises. Avant toute chose, il est donc nécessaire de réfléchir au niveau d'intégration de la tâche dans l'environnement virtuel, afin de non seulement exploiter au maximum la dimension écologique que permet la réalité virtuelle, mais aussi de minimiser l'angle φ , soit l'angle de différences d'allocation de ressources attentionnelles entre sentiment de présence et performance (ou, autrement dit, le degré d'intégration de la tâche dans l'environnement virtuel). Cet angle pourrait par exemple être largement réduit dans Neuroprésence en utilisant un labyrinthe avec de nombreuses portes sur lesquelles figurent les signes des cartes du Wisconsin Card Sorting Test. En effet, de cette façon, lorsque le participant répond à la tâche neuropsychologique d'association entre les symboles, celui-ci provoque également une intégration comportementale dans l'environnement, associant performance et présence. Au contraire, la valeur de cet angle est faible dans Spatioprésence, où présence et performance partagent de nombreux processus, et dont la tâche de cognition spatiale peut être considérée comme une tâche fortement intégrée à l'environnement. Toute expérimentation en réalité virtuelle devrait donc être conceptualisée théoriquement afin de réduire cet angle φ au minimum, et ce dans le but de proposer une tâche intégrée et écologique.

Cependant, cette élaboration d'une tâche intégrée dans l'environnement ne devrait pas se faire au détriment d'une réduction du sentiment de présence. En effet, et comme nous l'avons vu avec

les équations symboliques permettant de définir la dimension écologique d'une performance, des niveaux suffisants à la fois de présence et de performance sont nécessaires. Concernant les recommandations destinées à augmenter le sentiment de présence, nous invitons à considérer les facteurs facilitateurs énoncés en introduction, et notamment la méta-analyse de (Cummings & Bailenson, 2016). Pour résumer, il est généralement souhaitable d'éliminer tout délai de traitement et d'optimiser le nombre d'images par seconde, par exemple en bloquant le seuil (il est préférable de bloquer un taux d'images par seconde à 60 plutôt que de laisser des possibilités de fluctuation), ou en optimisant l'environnement virtuel (pré-calcul des lumières, utilisation de *shaders* dynamiques plutôt que de systèmes de particules, diminution du nombre de polygones, utilisation de l'occlusion, ou du *fovea rendering* si possibilité...). De plus, il est important de proposer des environnements cohérents – le réalisme ne semblant pas primordial – avec lesquels les participants peuvent interagir facilement – si possible via des schèmes cognitifs connus – ainsi que de faciliter la prise en main de l'interface ou encore de représenter le corps du sujet, même grossièrement (par exemple en utilisant le suivi des contrôleurs pour représenter des mains virtuelles). Ces facteurs sont particulièrement importants car ils coïncident également avec des facteurs de réduction des cybermalaises.

Au-delà de l'aspect désagréable pour les participants et les patients, les cybermalaises semblent en effet impacter à la fois le sentiment de présence et la performance cognitive en réduisant les ressources attentionnelles disponibles pour l'un ou pour l'autre. Cet effet est d'autant plus important à réduire qu'il ne touche pas tous les participants de la même façon, créant des biais expérimentaux. En plus des facteurs énoncés similaires à ceux allant dans le sens d'augmentation de la présence (représenter le corps du sujet permet à la fois une meilleure immersion et intégration dans l'environnement, mais aussi des repères fixes et une meilleure cohérence des informations proprioceptives et visuelles), d'autres données sont à prendre en compte concernant les effets négatifs lors de l'élaboration d'une expérimentation, par exemple la possibilité pour le participant d'être assis, ainsi que la présentation d'un fond indépendant stable (des montagnes au loin) ou d'un cadre de référence proche (le cockpit de l'avion). Il est également recommandé de limiter les déplacements de caméra non synchronisés avec les entrées sensorielles vestibulaires, par exemple en instaurant un déplacement par téléportation plutôt qu'un déplacement linéaire, ou, si le déplacement est nécessaire, limiter sa vitesse (Clifton & Palmisano, 2019; Garcia-Agundez et al., 2017).

6.2.2.2. Phase de passation de l'expérimentation

Il est bien évidemment nécessaire, éthiquement, de prévenir les participants de la possibilité des potentiels dangers de la réalité virtuelle, et d'insister sur la possibilité de se retirer de l'étude à tout moment, notamment en cas d'émergence de symptômes de cybermalaises. Les principaux dangers de la réalité virtuelle tels que discutés dans Behr et al. (2005) et Slater et al. (2020) sont en effet : i) les cybermalaises, ii) la surcharge d'informations, iii) l'intensification de l'expérience et iv) les troubles cognitifs émotionnels et comportementaux lors du retour dans la réalité physique. Pour une discussion de l'éthique de la réalité virtuelle, le lecteur est invité à (re)lire la partie homonyme en introduction de ce présent travail ainsi que les travaux suivants : Behr et al., (2005), Madary & Metzinger, (2016), Slater et al., (2020), Wassom (2015). Cependant, la question de l'énonciation a priori des cybermalaises pourrait être discutée ou du moins nuancée car les manifestations de cinétoses semblent largement impactées par la construction psychologique : il existe par exemple un effet placebo permettant de réduire les effets négatifs, ainsi qu'un effet de l'attente de l'émergence de ces effets (Horing et al., 2013; M. E. Levine et al., 2006). Il est donc possible qu'insister sur ces effets négatifs augmente leur apparition, bien que des études supplémentaires soient nécessaires.

Quoi qu'il en soit, afin de réduire les cybermalaises au minimum et ainsi favoriser le sentiment de présence et une performance écologique, il est important de réaliser une calibration du système de suivi avant chaque expérimentation afin de maximiser la qualité de ce dernier (Davis et al., 2014). De plus, pour réaliser un comportement naturel il est nécessaire que le participant ne se sente pas en danger : l'espace disponible physiquement doit donc être conséquent et montré physiquement, et si possible délimité virtuellement (par exemple lorsque le participant s'approche d'un mur). Il peut être pertinent de nommer et montrer, avant l'immersion, les différents boutons et interfaces utilisés physiquement, afin que les participants puissent associer les noms utilisés et les boutons. Enfin, la distance interpupillaire des utilisateurs doit être mesurée et appliquée aux paramètres du système immersif (Stanney et al., 2020). Il peut, dépendamment des possibilités, se révéler pertinent de proposer aux participants des tutoriels virtuels permettant de prendre en main l'interface, afin de réduire les différences ergonomiques (et donc non dues à des différences dans la performance évaluée) inter-sujets. L'idéal serait par exemple de proposer une tâche seuil que les participants doivent résoudre correctement avant de commencer l'expérimentation. Concernant l'immersion, il est bien évidemment important de préserver le participant immergé de tous les stimuli issus de la réalité physique possibles et présentant autant de possibilités de rupture de présence, que ce soit des stimuli auditifs (des portes qui claquent, des bruits de voiture ou de conversation, ou encore des notifications issues de l'ordinateur responsable du rendu qu'il est

impératif de supprimer) ou haptiques (faire en sorte que les participants sentent le moins possible le matériel immersif). Enfin, le contrôle du sentiment de présence et des cybermalaises de chaque participant devrait être fondamental, par exemple de façon classique à l'aide de questionnaires. Il peut s'avérer pertinent de réaliser ces évaluations, tout comme l'évaluation de la performance, directement en réalité virtuelle (Schwind et al., 2019). Concernant les autres facteurs humains, il peut s'avérer intéressant, et particulièrement en cas d'évaluations destinées à être normalisées, de noter le genre des participants ainsi que leur pratique des jeux vidéo, mais uniquement a posteriori afin de ne pas activer de menaces du stéréotype (Koch et al., 2008). Enfin, il est généralement conseillé de ne pas réaliser des sessions d'immersion trop longues et sans pause (par exemple tous les quarts d'heure), de contrôler la durée d'immersion pour chaque individu et enfin de garder les participants quelque temps après la séance afin de s'assurer de l'absence d'effets négatifs trop importants, notamment dans les cas où les individus seraient amenés à pratiquer la conduite de véhicule.

6.2.2.3. Phase de traitement des données

Une fois les données récoltées, il devrait être fondamental de vérifier les scores de cybermalaises ainsi que de présence, notamment de les comparer aux scores de référence des questionnaires utilisés. Des niveaux significativement inférieurs de présence et / ou significativement supérieurs de cybermalaises devraient alerter les chercheurs sur la validité de leur étude. Les participants présentant des données exorbitantes aux scores de cybermalaise (supérieurs à la moyenne de deux écarts-types) et de présence (inférieurs à la moyenne de deux écart-types) devraient être exclus des analyses pour une meilleure validité. Il peut ensuite être pertinent de s'assurer qu'il n'existe pas de trop grandes différences entre les genres, notamment sur les symptômes négatifs des cybermalaises. Enfin, il serait optimal de procéder à une analyse permettant d'évaluer si la performance évaluée n'est pas affectée, outre mesure, par les cybermalaises ou des taux de présence et de pratique des jeux vidéo largement différents. S'il existe un effet et que cette mesure n'est pas l'objet de l'étude, il peut s'avérer judicieux de contrôler ces variables, par exemple à l'aide d'analyses de covariance. Dans le futur, en cas d'évaluations de performances dans des buts de diagnostics il sera fondamental de comparer les scores obtenus aux données normalisées sur cette même tâche et ce même matériel immersif (âge, genre, niveau d'étude, profil cognitif, facteurs systèmes, expérience utilisateur). Enfin, les auteurs devraient, à la fois pour contrôler leurs analyses mais aussi pour permettre des méta-analyses et des revues de littérature, et même lorsque le sujet d'étude n'est pas la réalité virtuelle en elle-même, systématiquement rapporter les

niveaux de ces variables dans leurs articles pour pouvoir les considérer au regard de l'environnement et de la tâche. Pour ce faire, il peut être pertinent de partager une courte vidéo illustrant un extrait ou l'intégralité de l'environnement virtuel, ainsi qu'un rapport présentant en détail le matériel et le logiciel utilisé ainsi que les performances informatiques (au minimum le nombre d'images par seconde et les degrés de liberté du système de suivi). Enfin, l'utilisation et le partage des différentes mesures évoquées dans le modèle précédent devrait permettre une standardisation et une vérification rapide de la qualité écologique ainsi que de l'impact des cybermalaises au sein l'expérimentation virtuelle, en plus de permettre des comparaisons avec d'autres études.

6.3. Synthèse & perspectives

Le présent travail, que ce soit par ses discussions ou ses résultats expérimentaux, contribue au développement théorique et empirique de la réalité virtuelle et promeut son utilisation scientifique, principalement dans l'investigation du comportement humain, que ce soit à des visées de recherche, de diagnostic, d'apprentissage ou de réhabilitation. La définition de son cadre théorique permet une mise en perspective des nombreuses connaissances et techniques du domaine, notamment au vu de théories différentes de la cognition et de la perception humaines, présentées comme des pistes de réflexion fructueuses dans ce domaine largement transversal. Les expérimentations réalisées pour et durant ce travail contribuent également à cet avancement, ne serait-ce qu'en proposant des exemples de protocoles appliqués d'investigation du comportement en réalité virtuelle. Ces résultats, au-delà de faire de la réalité virtuelle un outil de choix du chercheur, que ce soit en réduisant le stress de laboratoire, en rendant possible une évaluation écologique méthodologiquement rigoureuse ou encore en tirant profit de ses apports pour de nouvelles formes d'apprentissage, devraient pouvoir servir de socle matériel à la fois aux réflexions théoriques et à la réalisation d'expérimentations et de méthodologies futures. Ce socle méthodologique et fondamental est lui-même renforcé par le présent travail, notamment en permettant une meilleure compréhension des dynamiques entre facteurs humains, facteurs systèmes et performance en réalité virtuelle, par exemple en révélant l'impact de l'évolution de la dépendance au champ sur les taux de présence et de cybermalaise lors d'une simple immersion. Cette exploration synthétisée a rendu possible l'élaboration d'un modèle conceptuel dont les retombées sont autant fondamentales que appliquées : cette compréhension est en effet, au-delà de l'aspect de la recherche pure, crucialement nécessaire afin d'appréhender et, au besoin, neutraliser les biais potentiellement inhérents à l'outil. Ce modèle conceptuel, accompagné des équations symboliques, permet une clarification des différents processus en jeu durant l'interaction homme-machine, et servira de base, nous l'espérons, pour des améliorations futures. De la même façon, nous espérons que l'esquisse algorithmique ainsi que la liste de recommandations présentées en conclusion permettront d'aiguiller les acteurs du domaine afin de profiter au maximum des nombreux avantages de la réalité virtuelle, tout en préservant une validité expérimentale rigoureuse. Le développement d'un logiciel dédié aux utilisateurs de la réalité virtuelle mêlant *machine learning* et normalisation statistique est également une perspective de ce travail. Bien évidemment, de nombreuses études sont nécessaires pour poursuivre et affiner cette démarche méthodologique. Du point de vue fondamental, il est probablement nécessaire d'approfondir la compréhension de l'effet du genre, effet qui reste en grande partie mystérieux et dont une partie de la zone d'ombre pourrait être révélée en investiguant plus en détail les composantes de la sensibilité aux cybermalaises, et notamment

son association avec le style cognitif et la pratique des jeux vidéo, par exemple sur des échantillons de femmes ayant une expérience vidéoludique ainsi qu'une dépendance au champ similaire à celle des hommes. De plus, une investigation plus approfondie de la relation entre présence, performance et ressources attentionnelles semble nécessaire, par exemple grâce à l'utilisation de paradigmes de double-tâche, notamment au regard de l'intégration de la performance dans l'environnement. Enfin, et pour une implémentation méthodologiquement fiable des tests psychologiques en réalité virtuelle, il est nécessaire de proposer une standardisation des tests les plus classiques qui serait commune aux utilisateurs et associée à une banque de données permettant une évaluation normalisée de la performance individuelle. En effet, si la réalité virtuelle semble être un outil bien plus que prometteur, il est fondamental que les acteurs du domaine gardent à l'esprit que tant que la technologie ne sera pas tout à fait invisible pour le sujet celle-ci ne sera jamais une simple transposition virtuelle de la réalité physique, mais bien un nouveau paradigme scientifique et méthodologique.

Références bibliographiques

- 360 Video and Virtual Reality. (2020). BBC R&D. <https://www.bbc.co.uk/rd/projects/360-video-virtual-reality>
- Abernethy, B., Maxwell, J. P., Masters, R. S. W., Kamp, J. V. D., & Jackson, R. C. (2012). Attentional Processes in Skill Learning and Expert Performance. In *Handbook of Sport Psychology* (pp. 245–263). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118270011.ch11>
- Abichou, K., La Corte, V., & Piolino, P. (2017). Does virtual reality have a future for the study of episodic memory in aging? *Geriatric Et Psychologie Neuropsychiatrie Du Vieillessement*, 15(1), 65–74. <https://doi.org/10.1684/pnv.2016.0648>
- Acovino, V. (2020). “Half-Life: Alyx” And The Promise of Virtual Reality. NPR.Org. <https://www.npr.org/2020/04/09/820648379/half-life-alyx-and-the-promise-of-virtual-reality>
- Adams, F. (2010). Embodied cognition. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 9(4), 619–628. <https://doi.org/10.1007/s11097-010-9175-x>
- Alaraj, A., Lemole, M. G., Finkle, J. H., Yudkowsky, R., Wallace, A., Luciano, C., Banerjee, P. P., Rizzi, S. H., & Charbel, F. T. (2011). Virtual reality training in neurosurgery: Review of current status and future applications. *Surgical Neurology International*, 2. <https://doi.org/10.4103/2152-7806.80117>
- Alcaniz, M., Rey, B., Tembl, J., & Parkhutik, V. (2009). A Neuroscience Approach to Virtual Reality Experience Using Transcranial Doppler Monitoring. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 18(2), 97–111. <https://doi.org/10.1162/pres.18.2.97>
- Allahyar, M., & Hunt, E. (2003). The Assessment of Spatial Orientation Using Virtual Reality Techniques. *International Journal of Testing*, 3(3), 263–275. https://doi.org/10.1207/S15327574IJT0303_5
- Allison, S. L., Fagan, A. M., Morris, J. C., & Head, D. (2016). Spatial Navigation in Preclinical Alzheimer’s Disease. *Journal of Alzheimer’s Disease: JAD*, 52(1), 77–90. <https://doi.org/10.3233/JAD-150855>
- Allport, G. W. (1985). The Historical Background of Social Psychology. In *The Handbook of Social Psychology* (G. Lindzey and E. Aronson).
- Almufareh, M., Abaoud, D., & Moniruzzaman, M. (2018). Taxonomy Development for Virtual Reality (VR) Technologies in Healthcare Sector. In S. Chatterjee, K. Dutta, & R. P. Sundarraj

- (Eds.), *Designing for a Digital and Globalized World* (pp. 146–156). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91800-6_10
- Alsina-Jurnet, I., & Gutiérrez-Maldonado, J. (2010). Influence of Personality and Individual Abilities on the Sense of Presence Experienced in Anxiety Triggering Virtual Environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 68(10), 788–801. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2010.07.001>
- Anderson, J. R. (2013). *Language, Memory, and Thought*. Psychology Press.
- Angelino, L. (2008). L'a priori du corps chez Merleau-Ponty. *Revue internationale de philosophie*, n° 244(2), 167–187.
- Arns, L. L., & Cerney, M. M. (2005). The relationship between age and incidence of cybersickness among immersive environment users. *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005.*, 267–268. <https://doi.org/10.1109/VR.2005.1492788>
- Artaud, A. (1985). *Le Théâtre et son double / Le Théâtre de Séraphin*. Folio.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1971). The Control of Short-Term Memory. *Scientific American*, 225(2), 82–91. JSTOR.
- Auvray, M., & Fuchs, P. (2007). Perception, immersion et interactions sensorimotrice en environnement virtuel. *Intellectica. Revue de l'Association pour la Recherche Cognitive*, 45(1), 23–35. <https://doi.org/10.3406/intel.2007.1265>
- Aymerich-Franch, L. (2010). Presence and Emotions in Playing a Group Game in a Virtual Environment: The Influence of Body Participation. *Cyberpsychology Behavior and Social Networking*, 13(6), 649–654. <https://doi.org/10.1089/cyber.2009.0412>
- Baddeley, A. (2007). *Working Memory, Thought, and Action* (1st ed.). OUP Oxford.
- Bailenson, J. (2018a). *Experience on Demand: What Virtual Reality Is, How It Works, and What It Can Do* (1 edition). W. W. Norton & Company.
- Bailenson, J. (2018b). Protecting Nonverbal Data Tracked in Virtual Reality. *JAMA Pediatrics*, 172(10), 905–906. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2018.1909>
- Bailenson, J., Blascovich, J., Beall, A. C., & Loomis, J. M. (2016). Interpersonal Distance in Immersive Virtual Environments: *Personality and Social Psychology Bulletin*. <https://doi.org/10.1177/0146167203029007002>
- Balakrishnan, B., & Sundar, S. S. (2011). Where Am I? How Can I Get There? Impact of Navigability and Narrative Transportation on Spatial Presence. *Human-Computer Interaction*, 26(3), 161–204. <https://doi.org/10.1080/07370024.2011.601689>

- Banakou, D., Hanumanthu, P. D., & Slater, M. (2016). Virtual Embodiment of White People in a Black Virtual Body Leads to a Sustained Reduction in Their Implicit Racial Bias. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00601>
- Banakou, D., Kishore, S., & Slater, M. (2018). Virtually Being Einstein Results in an Improvement in Cognitive Task Performance and a Decrease in Age Bias. *Frontiers in Psychology*, *9*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00917>
- Baniqued, P. L., Lee, H., Voss, M. W., Basak, C., Cosman, J. D., DeSouza, S., Severson, J., Salthouse, T. A., & Kramer, A. F. (2013). Selling points: What cognitive abilities are tapped by casual video games? *Acta Psychologica*, *142*(1), 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.11.009>
- Baños, R. M., Botella, C., Alcañiz, M., Liaño, V., Guerrero, B., & Rey, B. (2004). Immersion and emotion: Their impact on the sense of presence. *Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, *7*(6), 734–741. <https://doi.org/10.1089/cpb.2004.7.734>
- Banville, F., Couture, J.-F., Verhulst, E., Besnard, J., Richard, P., & Allain, P. (2017). Using Virtual Reality to Assess the Elderly: The Impact of Human-Computer Interfaces on Cognition. In S. Yamamoto (Ed.), *Human Interface and the Management of Information: Supporting Learning, Decision-Making and Collaboration* (pp. 113–123). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58524-6_10
- Barceló, F., Sanz, M., Molina, V., & Rubia, F. J. (1997). The Wisconsin Card Sorting Test and the assessment of frontal function: A validation study with event-related potentials. *Neuropsychologia*, *35*(4), 399–408.
- Barfield, W., & Hendrix, C. M. (1995). The effect of update rate on the sense of presence within virtual environments. *Virtual Reality*, *1*, 3–15. <https://doi.org/10.1007/BF02009709>
- Barfield, W., & Weghorst, S. (1993). The Sense of Presence within Virtual Environments: A Conceptual Framework. *HCI*.
- Barfield, W., Zeltzer, D., Sheridan, T., & Slater, M. (1995). *Virtual Environments and Advanced Interface Design* (W. Barfield & T. A. Furness III, Eds.; pp. 473–513). Oxford University Press, Inc. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=216164.216189>
- Barreau, J.-B., Gaugne, R., Bernard, Y., Le Cloirec, G., & Gouranton, V. (2014). Virtual reality tools for the west digital conservatory of archaeological heritage. *Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference*, 1–4. <https://doi.org/10.1145/2617841.2617845>
- Barrett, J. (2004). *Side Effects of Virtual Environments: A review of the literature*. Defense science and technology organisation.

- Bates, J. (1992). Virtual Reality, Art, and Entertainment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 133–138. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.133>
- Bateson, M., Nettle, D., & Roberts, G. (2006). Cues of being watched enhance cooperation in a real-world setting. *Biology Letters*, 2(3), 412–414. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2006.0509>
- Baumann, S., Neff, C., Fetzick, S., Stangl, G., Basler, L., Vereneck, R., & Schneider, W. (2003). A Virtual Reality System for Neurobehavioral and Functional MRI Studies. *CyberPsychology & Behavior*, 6(3), 259–266. <https://doi.org/10.1089/109493103322011542>
- Baumgartner, T., Speck, D., Wettstein, D., Masnari, O., Beeli, G., & Jäncke, L. (2008). Feeling present in arousing virtual reality worlds: Prefrontal brain regions differentially orchestrate presence experience in adults and children. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2, 8. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.008.2008>
- Baumgartner, T., Valko, L., Esslen, M., & Jäncke, L. (2006). Neural Correlate of Spatial Presence in an Arousing and Noninteractive Virtual Reality: An EEG and Psychophysiology Study. *CyberPsychology & Behavior*, 9(1), 30–45. <https://doi.org/10.1089/cpb.2006.9.30>
- Becoming Homeless: A Human Experience*. (2017). VHIL. <https://vhil.stanford.edu/becoming-homeless/>
- Behm-Morawitz, E. (2013). Mirrored selves: The influence of self-presence in a virtual world on health, appearance, and well-being. *Computers in Human Behavior*, 29(1), 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.07.023>
- Behm-Morawitz, E., & Mastro, D. (2009). The Effects of the Sexualization of Female Video Game Characters on Gender Stereotyping and Female Self-Concept. *Sex Roles*, 61(11), 808–823. <https://doi.org/10.1007/s11199-009-9683-8>
- Behr, K.-M., Nosper, A., Klimmt, C., & Hartmann, T. (2005). Some Practical Considerations of Ethical Issues in VR Research. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(6), 668–676. <https://doi.org/10.1162/105474605775196535>
- Behrendt, R.-P. (2013a). Conscious experience and episodic memory: Hippocampus at the crossroads. *Frontiers in Psychology*, 4, 304. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00304>
- Behrendt, R.-P. (2013b). Hippocampus and consciousness. *Reviews in the Neurosciences*, 24(3), 239–266. <https://doi.org/10.1515/revneuro-2012-0088>
- Belghali, M., Chastan, N., Davenne, D., & Decker, L. M. (2017). Improving Dual-Task Walking Paradigms to Detect Prodromal Parkinson's and Alzheimer's Diseases. *Frontiers in Neurology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00207>
- Berg, E. A. (1948). A simple objective technique for measuring flexibility in thinking. *The Journal of General Psychology*, 39, 15–22. <https://doi.org/10.1080/00221309.1948.9918159>

- Berliner, T., & Cohen, D. J. (2011). The Illusion of Continuity: Active Perception and the Classical Editing System. *Journal of Film and Video*, 63(1), 44–63. JSTOR. <https://doi.org/10.5406/jfilmvideo.63.1.0044>
- Bernhardt, J., Dusek, G., Hesse, A., Santos, W., Jennings, T., Smiros, A., & Montes, A. (2020). Developing a Virtual Reality Video Game to Simulate Rip Currents. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, 161. <https://doi.org/10.3791/61296>
- Besnard, J., Richard, P., Banville, F., Nolin, P., Aubin, G., Gall, D. L., Richard, I., & Allain, P. (2016). Virtual reality and neuropsychological assessment: The reliability of a virtual kitchen to assess daily-life activities in victims of traumatic brain injury. *Applied Neuropsychology: Adult*, 23(3), 223–235. <https://doi.org/10.1080/23279095.2015.1048514>
- Bieser, J. C. T., & Hilty, L. M. (2018). Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 10(8), 2662. <https://doi.org/10.3390/su10082662>
- Biffi, E., Beretta, E., Diella, E., Panzeri, D., Maghini, C., Turconi, A. C., Strazzer, S., & Reni, G. (2015). Gait rehabilitation with a high tech platform based on virtual reality conveys improvements in walking ability of children suffering from acquired brain injury. *Conference Proceedings: ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference, 2015*, 7406–7409. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2015.7320103>
- Bigot, P. (1942). *Rome antique au IVE siècle apr. J.-C.*, (rééd. 1955). Vincent, Fréal et Cie.
- Billing, D. (2007). Teaching for transfer of core/key skills in higher education: Cognitive skills. *Higher Education*, 53(4), 483–516. <https://doi.org/10.1007/s10734-005-5628-5>
- Biocca, F. (2003). Can we resolve the book, the physical reality, and the dream state problems? From the two-pole to a three-pole model of shifts in presence. *EU Future and Emerging Technologies*. Presence Initiative Meeting, Venice.
- Biocca, F., Harms, C., & Burgoon, J. K. (2003). Toward a More Robust Theory and Measure of Social Presence: Review and Suggested Criteria. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(5), 456–480. <https://doi.org/10.1162/105474603322761270>
- Biocca, F., Kim, J., & Choi, Y. (2001). Visual Touch in Virtual Environments: An Exploratory Study of Presence, Multimodal Interfaces, and Cross-Modal Sensory Illusions. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 247–265. <https://doi.org/10.1162/105474601300343595>
- Blanchet, S. (2015). Attentional Resources Theory. In *The Encyclopedia of Adulthood and Aging* (pp. 1–5). American Cancer Society. <https://doi.org/10.1002/9781118521373.wbeaa070>

- Blanke, O., Slater, M., & Serino, A. (2015). Behavioral, Neural, and Computational Principles of Bodily Self-Consciousness. *Neuron*, 88(1), 145–166. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.029>
- Blascovich, J., Loomis, J., Beall, A. C., Swinth, K. R., Hoyt, C. L., & Bailenson, J. (2002). Immersive Virtual Environment Technology as a Methodological Tool for Social Psychology. *Psychological Inquiry*, 13(2), 103–124. https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1302_01
- Blondé, P., Makowski, D., Sperduti, M., & Piolino, P. (2020). In Medio Stat Virtus: Intermediate levels of mind wandering improve episodic memory encoding in a virtual environment. *Psychological Research*. <https://doi.org/10.1007/s00426-020-01358-5>
- Böcking, S. (2008). Suspension of Disbelief. In *The International Encyclopedia of Communication*. American Cancer Society. <https://doi.org/10.1002/9781405186407.wbiecs121>
- Bohil, C. J., Alicea, B., & Biocca, F. A. (2011). Virtual reality in neuroscience research and therapy. *Nature Reviews. Neuroscience*, 12(12), 752–762. <https://doi.org/10.1038/nrn3122>
- Bonnett, J. (2003). Following in Rabelais' Footsteps: Immersive History and the 3D Virtual Buildings Project. *Journal of the Association for History and Computing*. <http://hdl.handle.net/2027/spo.3310410.0006.202>
- Boone, A. P., Gong, X., & Hegarty, M. (2018). Sex differences in navigation strategy and efficiency. *Memory & Cognition*, 46(6), 909–922. <https://doi.org/10.3758/s13421-018-0811-y>
- Boone, K. B., Ghaffarian, S., Lesser, I. M., Hill-Gutierrez, E., & Berman, N. G. (1993). Wisconsin card sorting test performance in healthy, older adults: Relationship to age, sex, education, and IQ. *Journal of Clinical Psychology*, 49(1), 54–60. [https://doi.org/10.1002/1097-4679\(199301\)49:1<54::AID-JCLP2270490108>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/1097-4679(199301)49:1<54::AID-JCLP2270490108>3.0.CO;2-6)
- Boot, W. R., Blakely, D. P., & Simons, D. J. (2011). Do Action Video Games Improve Perception and Cognition? *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00226>
- Borba, E. Z., Cabral, M., Lopes, R. de D., Zuffo, M. K., & Kopper, R. (2016). A Fully Immersive Virtual Model to Explore Archaeological Sites. In T. Hollerer, V. Interrante, A. Lecuyer, & E. Suma (Eds.), *2016 IEEE Virtual Reality Conference (vr)* (pp. 326–326). Ieee.
- Borba, E. Z., Montes, A., Almeida, M., Nagamura, M., Lopes, R., Zuffo, M. K., Araujo, A., & Kopper, R. (2017). ArcheoVR: Exploring Itapeva's Archeological Site. In *2017 IEEE Virtual Reality (vr)* (pp. 463–464). Ieee Computer Soc.
- Borba, E. Z., Montes, A., Lopes, R. de D., Zuffo, M. K., & Kopper, R. (2017). Itapeva 3D: Being Indiana Jones in Virtual Reality. In *2017 IEEE Virtual Reality (vr)* (pp. 361–362). Ieee Computer Soc.

- Borrego, A., Latorre, J., Alcañiz, M., & Llorens, R. (2019). Embodiment and Presence in Virtual Reality After Stroke. A Comparative Study With Healthy Subjects. *Frontiers in Neurology*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.01061>
- Bos, J. E., Bles, W., & Groen, E. L. (2008). A theory on visually induced motion sickness. *Displays*, *29*, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2007.09.002>
- Bossard, C., Kermarrec, G., Buche, C., & Tisseau, J. (2008). Transfer of learning in virtual environments: A new challenge? *Virtual Reality*, *12*(3), 151–161. <https://doi.org/10.1007/s10055-008-0093-y>
- Bosser, A.-G., & Nakatsu, R. (2006). Hardcore gamers and casual gamers playing online together. *Proceedings of the 5th International Conference on Entertainment Computing*, 374–377. https://doi.org/10.1007/11872320_53
- Bostrom, N. (2003). Are We Living in a Computer Simulation? *The Philosophical Quarterly*, *53*(211), 243–255. <https://doi.org/10.1111/1467-9213.00309>
- Botella, C., Fernández-Álvarez, J., Guillén, V., García-Palacios, A., & Baños, R. (2017). Recent Progress in Virtual Reality Exposure Therapy for Phobias: A Systematic Review. *Current Psychiatry Reports*, *19*(7), 42. <https://doi.org/10.1007/s11920-017-0788-4>
- Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, *391*(6669), 756–756. <https://doi.org/10.1038/35784>
- Bouchard, S., Robillard, G., & Renaud, P. (2007). Revising the factor structure of the Simulator Sickness Questionnaire. *Acte de Colloque Du Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, *5*.
- Bouchard, S., St-Jacques, J., Robillard, G., & Renaud, P. (2008a). Anxiety Increases the Feeling of Presence in Virtual Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *17*(4), 376–391. <https://doi.org/10.1162/pres.17.4.376>
- Bouchard, S., St-Jacques, J., Robillard, G., & Renaud, P. (2008b). Anxiety increases the feeling of presence in virtual reality. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, *17*(4), 376–391. <https://doi.org/10.1162/pres.17.4.376>
- Boukhalfi, T., Joyal, C., Bouchard, S., Neveu, S. M., & Renaud, P. (2015). Tools and Techniques for Real-time Data Acquisition and Analysis in Brain Computer Interface studies using qEEG and Eye Tracking in Virtual Reality Environment. *IFAC-PapersOnLine*, *48*(3), 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.056>
- Boyle, E. A., Hainey, T., Connolly, T. M., Gray, G., Earp, J., Ott, M., Lim, T., Ninaus, M., Ribeiro, C., & Pereira, J. (2016). An update to the systematic literature review of empirical evidence

- of the impacts and outcomes of computer games and serious games. *Computers & Education*, 94, 178–192. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.11.003>
- Brake, W. G., & Lacasse, J. M. (2018). Sex differences in spatial navigation: The role of gonadal hormones. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 23, 176–182. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.08.002>
- Braun, N., Debener, S., Spsychala, N., Bongartz, E., Sörös, P., Müller, H. H. O., & Philippsen, A. (2018). The Senses of Agency and Ownership: A Review. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00535>
- Brenner, A. (2017). Virtual Reality: The Game Changer for Residential Real Estate Staging through Increased Presence. *CMC Senior Theses*. https://scholarship.claremont.edu/cmc_theses/1471
- Breuer, J., Kowert, R., Festl, R., & Quandt, T. (2015). Sexist Games=Sexist Gamers? A Longitudinal Study on the Relationship Between Video Game Use and Sexist Attitudes. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 18(4), 197–202. <https://doi.org/10.1089/cyber.2014.0492>
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. Pergamin Press, Cambridge.
- Brogni, A., Slater, M., & Steed, A. (2003). *More Breaks Less Presence*.
- Brooker, C. (2014, Present). *Black Mirror*. Endemol Shine UK.
- Bruner, J. S., & Postman, L. (1949). On the Perception of Incongruity: A Paradigm. *Journal of Personality*, 18(2), 206–223. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6494.1949.tb01241.x>
- Bryson, S. (2013). Virtual Reality: A Definition History - A Personal Essay. *ArXiv:1312.4322 [Cs]*. <http://arxiv.org/abs/1312.4322>
- Bubic, A., Von Cramon, D. Y., & Schubotz, R. I. (2010). Prediction, cognition and the brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00025>
- Bulu, S. T. (2012). Place presence, social presence, co-presence, and satisfaction in virtual worlds. *Computers & Education*, 58(1), 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.08.024>
- Byagowi, A., & Moussavi, Z. (2012). Design of a Virtual Reality Navigational (VRN) experiment for assessment of egocentric spatial cognition. *Conference Proceedings: ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference, 2012*, 4812–4815. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2012.6347070>

- Bystrom, K.-E., Barfield, W., & Hendrix, C. (1999). A Conceptual Model of the Sense of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), 241–244. <https://doi.org/10.1162/105474699566107>
- Cameron, E. L. (2014). Pregnancy and olfaction: A review. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00067>
- Cameron, J. (2009). *Avatar*. 20th Century Fox.
- Campbell, J. P., McHENRY, J. J., & Wise, L. L. (1990). Modeling Job Performance in a Population of Jobs. *Personnel Psychology*, 43(2), 313–575. <https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.1990.tb01561.x>
- Canning, C. G., Allen, N. E., Nackaerts, E., Paul, S. S., Nieuwboer, A., & Gilat, M. (2020). Virtual reality in research and rehabilitation of gait and balance in Parkinson disease. *Nature Reviews. Neurology*, 16(8), 409–425. <https://doi.org/10.1038/s41582-020-0370-2>
- Caponnetto, P., Maglia, M., Lombardo, D., Demma, S., & Polosa, R. (2018). The role of virtual reality intervention on young adult smokers' motivation to quit smoking: A feasibility and pilot study. *Journal of Addictive Diseases*, 37(3–4), 217–226. <https://doi.org/10.1080/10550887.2019.1664364>
- Carriedo, N., Corral, A., Montoro, P. R., Herrero, L., & Rucián, M. (2016). Development of the updating executive function: From 7-year-olds to young adults. *Developmental Psychology*, 52(4), 666–678. <https://doi.org/10.1037/dev0000091>
- Carrieri, M., Petracca, A., Lancia, S., Basso Moro, S., Brigadoi, S., Spezialetti, M., Ferrari, M., Placidi, G., & Quaresima, V. (2016). Prefrontal Cortex Activation Upon a Demanding Virtual Hand-Controlled Task: A New Frontier for Neuroergonomics. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00053>
- Cassidy, B., Sim, G., Robinson, D. W., & Gandy, D. (2019). A Virtual Reality Platform for Analyzing Remote Archaeological Sites. *Interacting with Computers*, 31(2), 167–176. <https://doi.org/10.1093/iwc/iwz011>
- Castelvecchi, D. (2016). Low-cost headsets boost virtual reality's lab appeal. *Nature*, 533(7602), 153–154. <https://doi.org/10.1038/533153a>
- Chavez, B., & Bayona, S. (2018). Virtual Reality in the Learning Process. In Á. Rocha, H. Adeli, L. P. Reis, & S. Costanzo (Eds.), *Trends and Advances in Information Systems and Technologies* (pp. 1345–1356). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77712-2_129
- Cheetham, M., Pedroni, A. F., Antley, A., Slater, M., & Jaencke, L. (2009). Virtual milgram: Empathic concern or personal distress? Evidence from functional MRI and dispositional

- measures. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3, 29. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.029.2009>
- Chekroun, P., & Brauer, M. (2002). The bystander effect and social control behavior: The effect of the presence of others on people's reactions to norm violations. *European Journal of Social Psychology*, 32(6), 853–867. <https://doi.org/10.1002/ejsp.126>
- Chen, C. J. (2009). Theoretical Bases for Using Virtual Reality in Education. *Themes in Science and Technology Education*, 2, 71–90.
- Chen, K. B., Sesto, M. E., Ponto, K., Leonard, J., Mason, A., Vanderheiden, G., Williams, J., & Radwin, R. G. (2017). Use of Virtual Reality Feedback for Patients with Chronic Neck Pain and Kinesiophobia. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(8), 1240–1248. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2621886>
- Choi, B. C. K., & Pak, A. W. P. (2004). A Catalog of Biases in Questionnaires. *Preventing Chronic Disease*, 2(1). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1323316/>
- Chung, H. C., Kim, S. H., Choi, G., Kim, J. W., Choi, M. Y., & Li, H. (2020). Using a Virtual Reality Walking Simulator to Investigate Pedestrian Behavior. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, 160. <https://doi.org/10.3791/61116>
- Chung, J., Yoon, H.-J., & Gardner, H. J. (2010). Analysis of Break in Presence During Game Play Using a Linear Mixed Model. *ETRI Journal*, 32(5), 687–694. <https://doi.org/10.4218/etrij.10.1510.0054>
- Cian, C., Ohlmann, T., Ceyte, H., Gresty, M. A., & Golding, J. F. (2011). Off vertical axis rotation motion sickness and field dependence. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 82(10), 959–963. <https://doi.org/10.3357/ase.3049.2011>
- Cipresso, P., Giglioli, I. A. C., Raya, M. A., & Riva, G. (2018). The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology*, 9, 2086. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02086>
- Cipresso, P., Serino, S., & Riva, G. (2016). Psychometric assessment and behavioral experiments using a free virtual reality platform and computational science. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 16, 37. <https://doi.org/10.1186/s12911-016-0276-5>
- Cismaru Inescu, A., Andrianne, R., & Triffaux, J.-M. (2013). Virtual reality as a complementary therapy to sexual addiction treatment. *International Journal of Advanced Computer Science*, 3(7). <https://orbi.uliege.be/handle/2268/150002>
- Clemente, M., Rodriguez, A., Rey, B., & Alcaniz, M. (2013). Measuring Presence During the Navigation In a Virtual Environment Using EEG. In B. K. Wiederhold & G. Riva (Eds.), *Annual*

- Review of Cybertherapy and Telemedicine 2013: Positive Technology and Health Engagement for Healthy Living and Active Ageing* (Vol. 191, pp. 136–140). Ios Press.
- Clemente, M., Rodriguez, A., Rey, B., & Alcaniz, M. (2014). Assessment of the influence of navigation control and screen size on the sense of presence in virtual reality using EEG. *Expert Systems with Applications*, *41*(4), 1584–1592. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.08.055>
- Clemes, S. A., & Howarth, P. A. (2005). The menstrual cycle and susceptibility to virtual simulation sickness. *Journal of Biological Rhythms*, *20*(1), 71–82. <https://doi.org/10.1177/0748730404272567>
- Clifton, J., & Palmisano, S. (2019). Effects of steering locomotion and teleporting on cybersickness and presence in HMD-based virtual reality. *Virtual Reality*. <https://doi.org/10.1007/s10055-019-00407-8>
- CNRTL. (2020). *Performance*. <https://www.cnrtl.fr/definition/performance>
- Coelho, C., Tichon, J., Hine, T. J., Wallis, G., & Riva, G. (2009). Media Presence and Inner Presence: The Sense of Presence in Virtual Reality Technologies. In Giuseppe Riva, M. T. Anguera, B. K. Wiederhold, & F. Mantovani (Eds.), *From Communication to Presence: Cognition, Emotions and Culture Towards the Ultimate Communicative Experience: Festschrift in Honor of Luigi Anolli* (Vol. 9, pp. 25–45). Ios Press.
- Cogné, M., Taillade, M., N’Kaoua, B., Tarruella, A., Klinger, E., Larrue, F., Sauzéon, H., Joseph, P.-A., & Sorita, E. (2017). The contribution of virtual reality to the diagnosis of spatial navigation disorders and to the study of the role of navigational aids: A systematic literature review. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, *60*(3), 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2015.12.004>
- Cohen, R. (2013). *The Development of Spatial Cognition*. Psychology Press.
- Coleman, B., Marion, S., Rizzo, A., Turnbull, J., & Nolty, A. (2019). Virtual Reality Assessment of Classroom – Related Attention: An Ecologically Relevant Approach to Evaluating the Effectiveness of Working Memory Training. *Frontiers in Psychology*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01851>
- Coluccia, E., & Louse, G. (2004). Gender differences in spatial orientation: A review. *Journal of Environmental Psychology*, *24*(3), 329–340. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2004.08.006>
- Conradi, S., & Masselin-Dubois, A. (2019). La kinésiophobie et le modèle d’évitement de la peur de la douleur dans l’évaluation psychologique. *Douleurs : Évaluation - Diagnostic - Traitement*, *20*(4), 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.douler.2018.12.005>

- Conway, A. R. A., & Engle, R. W. (1994). Working memory and retrieval: A resource-dependent inhibition model. *Journal of Experimental Psychology: General*, *123*(4), 354–373. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.123.4.354>
- Coomans, M. K. D., & Timmermans, H. J. P. (1997). Towards a taxonomy of virtual reality user interfaces. *Proceedings. 1997 IEEE Conference on Information Visualization (Cat. No.97TB100165)*, 279–284. <https://doi.org/10.1109/IV.1997.626531>
- Cooper, N., Milella, F., Pinto, C., Cant, I., White, M., & Meyer, G. (2018). The effects of substitute multisensory feedback on task performance and the sense of presence in a virtual reality environment. *PloS One*, *13*(2), e0191846. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191846>
- Coopersmith, J. (1998). Pornography, technology and progress. *Icon*, *4*, 94–125. JSTOR.
- Costa, P. T., & McCrae, R. R. (2012). The Five-Factor Model, Five-Factor Theory, and Interpersonal Psychology. In *Handbook of Interpersonal Psychology* (pp. 91–104). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118001868.ch6>
- Craig, A. D. (2009). How do you feel — now? The anterior insula and human awareness. *Nature Reviews Neuroscience*, *10*(1), 59–70. <https://doi.org/10.1038/nrn2555>
- Critchley, H. D. (2009). Psychophysiology of neural, cognitive and affective integration: fMRI and autonomic indicants. *International Journal of Psychophysiology*, *73*(2), 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2009.01.012>
- Crowne, D. P., & Marlowe, D. (1960). A new scale of social desirability independent of psychopathology. *Journal of Consulting Psychology*, *24*(4), 349–354. <https://doi.org/10.1037/h0047358>
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V., & Hart, J. C. (1992). *The CAVE: Audio visual experience automatic virtual environment*. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/129888.129892>
- Csikszentmihalyi, M. (1975). *Beyond Boredom and Anxiety*. Jossey-Bass Publishers.
- Cullen, C. (2019). *Sandvine releases 2019 Global Internet Phenomena Report*. <https://www.sandvine.com/press-releases/sandvine-releases-2019-global-internet-phenomena-report>
- Cummings, J. J., & Bailenson, J. (2016). How Immersive Is Enough? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence. *Media Psychology*, *19*(2), 272–309. <https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015740>
- Cushman, L. A., Stein, K., & Duffy, C. J. (2008). Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality. *Neurology*, *71*(12), 888–895. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000326262.67613.fe>

- Cutting, J. E. (1997). How the eye measures reality and virtual reality. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 29(1), 27–36. <https://doi.org/10.3758/BF03200563>
- Czerniak, E., Caspi, A., Litvin, M., Amiaz, R., Bahat, Y., Baransi, H., Sharon, H., Noy, S., & Plotnik, M. (2016). A Novel Treatment of Fear of Flying Using a Large Virtual Reality System. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 87(4), 411–416. <https://doi.org/10.3357/AMHP.4485.2016>
- da Costa, R. T., Sardinha, A., & Nardi, A. E. (2008). Virtual reality exposure in the treatment of fear of flying. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 79(9), 899–903. <https://doi.org/10.3357/ase.2277.2008>
- Daher, S., Kim, K., Lee, M., Bruder, G., Schubert, R., Bailenson, J., & Welch, G. F. (2017). Can Social Presence Be Contagious? Effects of Social Presence Priming on Interaction with Virtual Humans. In *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (pp. 201–202). IEEE.
- Daher, S., Kim, K., Lee, M., Raj, A., Schubert, R., Bailenson, J., & Welch, G. (2016). Exploring Social Presence Transfer in Real-Virtual Human Interaction. In T. Hollerer, V. Interrante, A. Lecuyer, & E. Suma (Eds.), *2016 IEEE Virtual Reality Conference (VR)* (pp. 165–166). IEEE.
- Damasio, A. (1994). *Descartes' Error: Emotion, Reason, and the Human Brain*. G.P. Putnam.
- Damasio, A. (1998). Investigating the biology of consciousness. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 353(1377), 1879–1882.
- Damasio, A. (1999). *The feeling of what happens: Body and emotion in the making of consciousness* (pp. xiv, 386). Harcourt College Publishers.
- D'Angelo, D. (2019). The phenomenology of embodied attention. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s11097-019-09637-2>
- Davis, S., Nesbitt, K., & Nalivaiko, E. (2014). A Systematic Review of Cybersickness. *Proceedings of the 2014 Conference on Interactive Entertainment*, 1–9. <https://doi.org/10.1145/2677758.2677780>
- Dawkins, C. S. P. of the P. U. of S. R., Dawkins, R., Dawkins, D., & DAWKINS, R. A. (1989). *The Selfish Gene*. Oxford University Press.
- Dawson, D. R., & Marcotte, T. D. (2017). Special issue on ecological validity and cognitive assessment. *Neuropsychological Rehabilitation*, 27(5), 599–602. <https://doi.org/10.1080/09602011.2017.1313379>

- de la Pena, N., Weil, P., Llobera, J., Giannopoulos, E., Pomes, A., Spanlang, B., Friedman, D., Sanchez-Vives, M. V., & Slater, M. (2010). Immersive Journalism: Immersive Virtual Reality for the First-Person Experience of News. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 19(4), 291–301. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00005
- De Leo, G., Diggs, L. A., Radici, E., & Mastaglio, T. W. (2014). Measuring sense of presence and user characteristics to predict effective training in an online simulated virtual environment. *Simulation in Healthcare: Journal of the Society for Simulation in Healthcare*, 9(1), 1–6. <https://doi.org/10.1097/SIH.0b013e3182a99dd9>
- Dehaene, S., Changeux, J.-P., Naccache, L., Sackur, J., & Sergent, C. (2006). Conscious, pre-conscious, and subliminal processing: A testable taxonomy. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(5), 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.03.007>
- Dennett, D. C. (2010). *Content and Consciousness* (1 edition). Routledge.
- Dewez, D., Fribourg, R., Argelaguet, F., Hoyet, L., Mestre, D., Slater, M., & Lécuyer, A. (2019). Influence of Personality Traits and Body Awareness on the Sense of Embodiment in Virtual Reality. *2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 123–134. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2019.00-12>
- Dhanda, A., Reina Ortiz, M., Weigert, A., Paladini, A., Min, A., Gyi, M., Su, S., Fai, S., & Santana Quintero, M. (2019). Recreating Cultural Heritage Environments for VR Using Photogrammetry. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42W9, 305–310. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-305-2019>
- Di Franco, P. D. G., Camporesi, C., Galeazzi, F., & Kallmann, M. (2015). 3D Printing and Immersive Visualization for Improved Perception of Ancient Artifacts. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 24(3), 243–264. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00229
- Dickerson, S. S., & Kemeny, M. E. (2004). Acute stressors and cortisol responses: A theoretical integration and synthesis of laboratory research. *Psychological Bulletin*, 130(3), 355–391. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.130.3.355>
- Diersch, N., & Wolbers, T. (2019). The potential of virtual reality for spatial navigation research across the adult lifespan. *Journal of Experimental Biology*, 222(Suppl 1). <https://doi.org/10.1242/jeb.187252>
- Dinh, H. Q., Walker, N., Hodges, L. F., Song, C., & Kobayashi, A. (1999, January 1). *Evaluating the importance of multi-sensory input on memory and the sense of presence in virtual environments*. Proceedings of the 1999 IEEE Virtual Reality, IEEE VR'99.

<https://jhu.pure.elsevier.com/en/publications/evaluating-the-importance-of-multi-sensory-input-on-memory-and-th-3>

- Disz, T., Papka, M., Stevens, R., Pellegrino, M., & Taylor, V. (1995). *Virtual reality visualization of parallel molecular dynamics simulation* (ANL/MCS/CP-87745; CONF-950431-6). Argonne National Lab., IL (United States). <https://www.osti.gov/biblio/197800>
- Dixson, M. D., Greenwell, M. R., Rogers-Stacy, C., Weister, T., & Lauer, S. (2017). Nonverbal immediacy behaviors and online student engagement: Bringing past instructional research into the present virtual classroom. *Communication Education*, 66(1), 37–53. <https://doi.org/10.1080/03634523.2016.1209222>
- Donalek, C., Djorgovski, S. G., Cioc, A., Wang, A., Zhang, J., Lawler, E., Yeh, S., Mahabal, A., Graham, M., Drake, A., Davidoff, S., Norris, J. S., & Longo, G. (2014). Immersive and collaborative data visualization using virtual reality platforms. *2014 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 609–614. <https://doi.org/10.1109/BigData.2014.7004282>
- Dong, X., Yoshida, K., & Stoffregen, T. A. (2011). Control of a virtual vehicle influences postural activity and motion sickness. *Journal of Experimental Psychology. Applied*, 17(2), 128–138. <https://doi.org/10.1037/a0024097>
- Draper, J. V., Kaber, D. B., & Usher, J. M. (1998). Telepresence. *Human Factors*. <https://doi.org/10.1518/001872098779591386>
- Drażkowski, D., Szwed, J., Krajczewska, A., Adamczuk, A., Piątkowski, K., Jadwizyc, M., & Rakowski, A. (2017). Women are not less field independent than men—the role of stereotype threat. *International Journal of Psychology: Journal International De Psychologie*, 52(5), 415–419. <https://doi.org/10.1002/ijop.12238>
- Dreyfus, H. L. (1991). *Being-in-the-world: A Commentary on Heidegger's Being and Time, Division I*. MIT Press.
- Duchowski, A. (2007). *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice* (2nd ed.). Springer-Verlag. <http://www.springer.com/gp/book/9781846286087>
- Duchowski, A., Medlin, E., Cournia, N., Murphy, H., Gramopadhye, A., Nair, S., Vorah, J., & Melloy, B. (2002). 3-D eye movement analysis. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 34(4), 573–591. <https://doi.org/10.3758/BF03195486>
- Duchowski, A. T., Medlin, E., Gramopadhye, A., Melloy, B., & Nair, S. (2001). Binocular eye tracking in VR for visual inspection training. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 1–8. <https://doi.org/10.1145/505008.505010>
- Duchowski, A. T., Shivashankaraiah, V., Rawls, T., Gramopadhye, A. K., Melloy, B. J., & Kanki, B. (2000). Binocular eye tracking in virtual reality for inspection training. *Proceedings of*

- the 2000 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, 89–96. <https://doi.org/10.1145/355017.355031>
- Duh, H. B.-L., Parker, D. E., Furness, T. A., A, H. B. L. D., B, D. E. P., & A, T. A. F. (2001). *Does a Peripheral Independent Visual Background Reduce Scene-Motion-Induced Balance Disturbance in an Immersive Environment?*
- Duval, S., & Wicklund, R. A. (1972). *A theory of objective self awareness* (pp. x, 238). Academic Press.
- Edelman, D. B., & Seth, A. K. (2009). Animal consciousness: A synthetic approach. *Trends in Neurosciences*, 32(9), 476–484. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2009.05.008>
- Edwards, B. (2015, August 21). *Unraveling The Enigma Of Nintendo's Virtual Boy, 20 Years Later*. Fast Company. <https://www.fastcompany.com/3050016/unraveling-the-enigma-of-nintendos-virtual-boy-20-years-later>
- Egan, D. E. (1988). Individual differences in human-computer interaction. In *Handbook of human-computer interaction* (pp. 543–568).
- Einstein, G. O., & McDaniel, M. A. (2005). Prospective Memory: Multiple Retrieval Processes. *Current Directions in Psychological Science*, 14(6), 286–290. JSTOR.
- Engle, R. W., Conway, A. R. A., Tuholski, S. W., & Shisler, R. J. (1995). A Resource Account of Inhibition. *Psychological Science*, 6(2), 122–125. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1995.tb00318.x>
- Entertainment software association. (2019). *Essential Facts about the computer and video game industry*.
- Epstein, R. A., Patai, E. Z., Julian, J. B., & Spiers, H. J. (2017). The cognitive map in humans: Spatial navigation and beyond. *Nature Neuroscience*, 20(11), 1504–1513. <https://doi.org/10.1038/nn.4656>
- Evans, C., Richardson, J. T. E., & Waring, M. (2013). Field independence: Reviewing the evidence. *The British Journal of Educational Psychology*, 83(Pt 2), 210–224. <https://doi.org/10.1111/bjep.12015>
- Fanuel, L., Plancher, G., & Piolino, P. (2020). Using More Ecological Paradigms to Investigate Working Memory: Strengths, Limitations and Recommendations. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00148>
- Farmaki, C., Sakkalis, V., Loesche, F., & Nisiforou, E. A. (2019). Assessing Field Dependence–Independence Cognitive Abilities Through EEG-Based Bistable Perception Processing. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00345>
- Fassbinder, R. W. (1973). *Welt am Draht*. Janus Films.

- Felnhofer, A., Kothgassner, O., Beutl, L., Hlavacs, H., & Kryspin-Exner, I. (2012, October). Is Virtual Reality made for Men only? Exploring Gender Differences in the Sense of Presence. *International Society for Presence Research Annual Conference – ISPR 2012*. International Society for Presence Research Annual Conference – ISPR 2012, Philadelphia, Pennsylvania, USA. <https://eprints.cs.univie.ac.at/3557/>
- Felnhofer, Anna, Kothgassner, O. D., Schmidt, M., Heinzle, A.-K., Beutl, L., Hlavacs, H., & Kryspin-Exner, I. (2015). Is virtual reality emotionally arousing? Investigating five emotion inducing virtual park scenarios. *International Journal of Human-Computer Studies*, 82, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2015.05.004>
- Feng, J., Spence, I., & Pratt, J. (2016). Playing an Action Video Game Reduces Gender Differences in Spatial Cognition: *Psychological Science*. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1111/j.1467-9280.2007.01990.x>
- Ferrand, G., English, J., & Irani, P. (2016). 3D visualization of astronomy data cubes using immersive displays. *ArXiv:1607.08874 [Astro-Ph]*. <http://arxiv.org/abs/1607.08874>
- Fisch, A., Mavroidis, C., Melli-Huber, J. B., & Bar-Cohen, Y. (2003). *Haptic Devices for Virtual Reality, Telepresence, and Human-Assistive Robotics*. <https://doi.org/10.1117/3.2068093.ch4>
- Flach, J. M., & Holden, J. G. (1998). The Reality of Experience: Gibson's Way. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(1), 90–95. <https://doi.org/10.1162/105474698565550>
- Fleury, P. (2014). Le plan de Rome de Paul Bigot. *Civiltà Romana*, 1, 109–124.
- Fleury, P., & Desbordes, O. (2008). *Roma Illustrata. Représentations de la ville*. Presses Universitaires de Caen.
- Fleury, P., & Madeleine, S. (2007). Réalité virtuelle et restitution de la Rome antique du IV^e siècle après J.-C. *Histoire urbaine*, n° 18(1), 157–165.
- Fleury, P., & Madeleine, S. (2011). Le “ Plan de Rome ” de Paul Bigot à l'Université de Caen et son double virtuel: De l'objet patrimonial à l'outil scientifique. *In Situ: Revue Des Patrimoines*, 17. <https://doi.org/10.4000/insitu.840>
- Fleury, P., & Madeleine, S. (2012). Reviving Ancient Rome: Virtual Reality at the Service of Cultural Heritage. In M. Ioannides, D. Fritsch, J. Leissner, R. Davies, F. Remondino, & R. Caffo (Eds.), *Progress in Cultural Heritage Preservation* (pp. 159–169). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_16

- Fleury, P., Madeleine, S., Lefèvre, N., Morineau, C., Gorzkowski, S., Leterrier, G., & Sammour, K. (2016). *Les Nocturnes du Plan de Rome: De la maquette de P. Bigot à la maquette virtuelle*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/medihal-02164687/>
- Fontanesi, L., & Renaud, P. (2014). Sexual presence: Toward a model inspired by evolutionary psychology. *New Ideas in Psychology*, *33*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.newideapsych.2013.10.001>
- Foreman, K. B., Wilson, C., Dibble, L. E., & Merryweather, A. S. (2019). Training Persons with Parkinson Disease using an Advanced CAVE Virtual Reality System. *The FASEB Journal*, *33*(1_supplement), 335.4-335.4. https://doi.org/10.1096/fasebj.2019.33.1_supplement.335.4
- Fosnot, C. T. (2013). *Constructivism: Theory, Perspectives, and Practice, Second Edition*. Teachers College Press.
- Fox, J., & Potocki, B. (2016). Lifetime Video Game Consumption, Interpersonal Aggression, Hostile Sexism, and Rape Myth Acceptance: A Cultivation Perspective. *Journal of Interpersonal Violence*, *31*(10), 1912–1931. <https://doi.org/10.1177/0886260515570747>
- Freeman, D., Haselton, P., Freeman, J., Spanlang, B., Kishore, S., Albery, E., Denne, M., Brown, P., Slater, M., & Nickless, A. (2018). Automated psychological therapy using immersive virtual reality for treatment of fear of heights: A single-blind, parallel-group, randomised controlled trial. *The Lancet. Psychiatry*, *5*(8), 625–632. [https://doi.org/10.1016/S2215-0366\(18\)30226-8](https://doi.org/10.1016/S2215-0366(18)30226-8)
- Freeman, D., Reeve, S., Robinson, A., Ehlers, A., Clark, D., Spanlang, B., & Slater, M. (2017). Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders. *Psychological Medicine*, *47*(14), 2393–2400. <https://doi.org/10.1017/S003329171700040X>
- Freeman, J., Avons, S. E., Meddis, R., Pearson, D. E., & IJsselsteijn, W. (2000). Using Behavioral Realism to Estimate Presence: A Study of the Utility of Postural Responses to Motion Stimuli. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *9*(2), 149–164. <https://doi.org/10.1162/105474600566691>
- Frischen, A., Bayliss, A. P., & Tipper, S. P. (2007). Gaze Cueing of Attention. *Psychological Bulletin*, *133*(4), 694–724. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.133.4.694>
- Fritsch, D., & Klein, M. (2018). 3D preservation of buildings—Reconstructing the past. *Multimedia Tools and Applications*, *77*(7), 9153–9170. <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4654-5>

- Fritz, C., Tosello, G., Azéma, M., Moreau, O., Perazio, G., & Péral, J. (2010). Restauration virtuelle de l'art pariétal paléolithique: Le cas de la grotte de Marsoulas. *In Situ. Revue des patrimoines*, 13, Article 13. <https://doi.org/10.4000/insitu.6774>
- Fuchs, P. (2016). *Les casques de réalité virtuelle et de jeux vidéo* (1st ed.). Transvalor - Presses des mines.
- Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A., & Vercher, J.-L. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle - Volume 1: L'homme et l'environnement virtuel* (3rd ed.). Transvalor - Presses des mines.
- Fuchs, P., Moreau, G., Burkhardt, J.-M., & Coquillart, S. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle - Volume 2: L'interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel*. Ecole des mines.
- Gamito, P., Oliveira, J., Morais, D., Baptista, A., Santos, N., Soares, F., Saraiva, T., & Rosa, P. (2010). Training presence: The importance of virtual reality experience on the "sense of being there." *Studies in Health Technology and Informatics*, 154, 128–133.
- Gamito, P., Oliveira, J., Morais, D., Santos, N., & Soares, F. (2008). Presence, immersion and cybersickness assessment through a test anxiety virtual environment. *Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine*, 83–90.
- Garau, M., Friedman, D., Widenfeld, H. R., Antley, A., Brogni, A., & Slater, M. (2008). Temporal and Spatial Variations in Presence: Qualitative Analysis of Interviews from an Experiment on Breaks in Presence. *Presence*, 17(3), 293–309. <https://doi.org/10.1162/pres.17.3.293>
- Garau, M., Slater, M., Vinayagamoorthy, V., Brogni, A., Steed, A., & Sasse, M. A. (2003). The impact of avatar realism and eye gaze control on perceived quality of communication in a shared immersive virtual environment. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 529–536. <https://doi.org/10.1145/642611.642703>
- Garcia-Agundez, A., Westmeier, A., Caserman, P., Konrad, R., & Göbel, S. (2017). An Evaluation of Extrapolation and Filtering Techniques in Head Tracking for Virtual Environments to Reduce Cybersickness. In M. Alcañiz, S. Göbel, M. Ma, M. Fradinho Oliveira, J. Baalsrud Hauge, & T. Marsh (Eds.), *Serious Games* (pp. 203–211). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70111-0_19
- Gavani, A. M., Nesbitt, K. V., Blackmore, K. L., & Nalivaiko, E. (2017). Profiling subjective symptoms and autonomic changes associated with cybersickness. *Autonomic Neuroscience: Basic & Clinical*, 203, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.12.004>
- Gelenbe, E., & Caseau, Y. (2015). The impact of information technology on energy consumption and carbon emissions. *Ubiquity*, 2015(June), 1:1–1:15. <https://doi.org/10.1145/2755977>

- Ghai, S., Ghai, I., & Lamontagne, A. (2020). Virtual reality training enhances gait poststroke: A systematic review and meta-analysis. *Annals of the New York Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1111/nyas.14420>
- Gianluca, M. (2010). *Metaplasticity in Virtual Worlds: Aesthetics and Semantic Concepts: Aesthetics and Semantic Concepts*. IGI Global.
- Gibson, J.-J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Houghton-Mifflin.
- Gibson, J.-J. (1977). How perception really develops: A view from outside the network. In *Basic processes in reading: Perception and comprehension* (pp. 155–173). Erlbaum.
- Gibson, J.-J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception* (Houghton Mifflin Harcourt (HMH)).
- Gibson, W. (1984). *Neuromancer* (1st edition). Ace.
- Girardeau, J.-C., Blondé, P., Makowski, D., Abram, M., Piolino, P., & Sperduti, M. (2020). The impact of state and dispositional mindfulness on prospective memory: A virtual reality study. *Consciousness and Cognition*, *81*, 102920. <https://doi.org/10.1016/j.con-cog.2020.102920>
- Giroux, I., Faucher-Gravel, A., St-Hilaire, A., Boudreault, C., Jacques, C., & Bouchard, S. (2013). Gambling exposure in virtual reality and modification of urge to gamble. *Cyberpsychology, Behavior and Social Networking*, *16*(3), 224–231. <https://doi.org/10.1089/cyber.2012.1573>
- Glennon, C., McElroy, S. F., Connelly, L. M., Mische Lawson, L., Bretches, A. M., Gard, A. R., & Newcomer, L. R. (2018). Use of Virtual Reality to Distract From Pain and Anxiety. *Oncology Nursing Forum*, *45*(4), 545–552. <https://doi.org/10.1188/18.ONF.545-552>
- Global Virtual Reality (VR) Industry*. (n.d.). Retrieved May 23, 2020, from https://www-reportlinker.com/p0960391/Global-Virtual-Reality-VR-in-Healthcare-Industry.html?utm_source=GNW
- Goffman, E. (1959). *The Presentation of Self in Everyday Life* (1 edition). Anchor.
- Gold, J. I., Belmont, K. A., & Thomas, D. A. (2007). The Neurobiology of Virtual Reality Pain Attenuation. *CyberPsychology & Behavior*, *10*(4), 536–544. <https://doi.org/10.1089/cpb.2007.9993>
- Gold, J. I., Kim, S. H., Kant, A. J., Joseph, M. H., & Rizzo, A. "Skip." (2006). Effectiveness of Virtual Reality for Pediatric Pain Distraction during IV Placement. *CyberPsychology & Behavior*, *9*(2), 207–212. <https://doi.org/10.1089/cpb.2006.9.207>
- Gorini, A., Capideville, C. S., De Leo, G., Mantovani, F., & Riva, G. (2011). The role of immersion and narrative in mediated presence: The virtual hospital experience. *Cyberpsychology, Behavior and Social Networking*, *14*(3), 99–105. <https://doi.org/10.1089/cyber.2010.0100>

- Grabarczyk, P., & Pokropski, M. (2016). Perception of Affordances and Experience of Presence in Virtual Reality. *AVANT*, *VII*(2), 20. <https://doi.org/10.26913/70202016.0112.00>
- Grassini, S., & Laumann, K. (2020). Questionnaire Measures and Physiological Correlates of Presence: A Systematic Review. *Frontiers in Psychology*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00349>
- Grassini, S., Laumann, K., & Rasmussen Skogstad, M. (2020). The Use of Virtual Reality Alone Does Not Promote Training Performance (but Sense of Presence Does). *Frontiers in Psychology*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01743>
- Green, C. Shawn, & Bavelier, D. (2003). Action video game modifies visual selective attention. *Nature*, *423*(6939), 534–537. <https://doi.org/10.1038/nature01647>
- Green, C.S., & Bavelier, D. (2006). Effect of Action Video Games on the Spatial Distribution of Visuospatial Attention. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *32*(6), 1465–1478. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.6.1465>
- Green, C.S., & Bavelier, D. (2007). Action-Video-Game Experience Alters the Spatial Resolution of Vision. *Psychological Science*, *18*(1), 88–94. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01853.x>
- Green, K. (2018). How VR Porn Is Secretly Driving The Industry. *VRFocus*. <https://www.vrfocus.com/2018/04/how-vr-porn-is-secretly-driving-the-industry/>
- Gregg, L., & Tarrier, N. (2007). Virtual reality in mental health. *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*, *42*(5), 343–354. <https://doi.org/10.1007/s00127-007-0173-4>
- Gresty, M. A., & Golding, J. F. (2009). Impact of vertigo and spatial disorientation on concurrent cognitive tasks. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1164*, 263–267. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2008.03744.x>
- Gresty, M. A., Golding, J. F., Le, H., & Nightingale, K. (2008). Cognitive impairment by spatial disorientation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *79*(2), 105–111.
- Grön, G., Wunderlich, A. P., Spitzer, M., Tomczak, R., & Riepe, M. W. (2000). Brain activation during human navigation: Gender-different neural networks as substrate of performance. *Nature Neuroscience*, *3*(4), 404–408. <https://doi.org/10.1038/73980>
- Grosbras, M.-H., Laird, A. R., & Paus, T. (2005). Cortical regions involved in eye movements, shifts of attention, and gaze perception. *Human Brain Mapping*, *25*(1), 140–154. <https://doi.org/10.1002/hbm.20145>
- Grush, R. (2004). The emulation theory of representation: Motor control, imagery, and perception. *The Behavioral and Brain Sciences*, *27*(3), 377–396; discussion 396-442. <https://doi.org/10.1017/s0140525x04000093>

- Guisande, M. A., Páramo, M. F., Tinajero, C., & Almeida, L. S. (2007). Field dependence-independence (FDI) cognitive style: An analysis of attentional functioning. *Psicothema*, *19*(4), 572–577.
- Gurusamy, K. S., Aggarwal, R., Palanivelu, L., & Davidson, B. R. (2009). Virtual reality training for surgical trainees in laparoscopic surgery. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, *1*. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD006575.pub2>
- Gutierrez-Maldonado, J., Gutierrez-Martinez, O., Loreto, D., Penaloza, C., & Nieto, R. (2010). Presence, Involvement and Efficacy of a Virtual Reality Intervention on Pain. In B. K. Wiederhold, G. Riva, & S. I. Kim (Eds.), *Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine 2010: Advanced Technologies in Behavioral, Social and Neurosciences* (Vol. 154, pp. 97–101). Ios Press.
- Gutierrez-Martinez, O., Gutierrez-Maldonado, J., Cabas-Hoyos, K., & Loreto, D. (2010). The Illusion of Presence Influences VR Distraction: Effects on Cold-pressor Pain. In B. K. Wiederhold, G. Riva, & S. I. Kim (Eds.), *Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine 2010: Advanced Technologies in Behavioral, Social and Neurosciences* (Vol. 154, pp. 155–159). Ios Press.
- Gutiérrez-Martínez, O., Gutiérrez-Maldonado, J., & Loreto-Quijada, D. (2011). Control over the virtual environment influences the presence and efficacy of a virtual reality intervention on pain. *Studies in Health Technology and Informatics*, *167*, 111–115.
- Hadjipanayi, C., & Michael-Grigoriou, D. (2020). Conceptual knowledge and sensitization on Asperger's syndrome based on the constructivist approach through virtual reality. *Heliyon*, *6*(6), e04145. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04145>
- Harms, C., & Biocca, F. (2004). *Internal consistency and reliability of the networked minds social presence measure*.
- Harris, L. R., Jenkin, M., Jenkin, H., Zacher, J. E., & Dyde, R. T. (2017). The effect of long-term exposure to microgravity on the perception of upright. *NPJ Microgravity*, *3*. <https://doi.org/10.1038/s41526-016-0005-5>
- Harvill, Y. L., Zimmerman, T. G., & Grimaud, J.-J. G. (1992). *Motion sensor which produces an asymmetrical signal in response to symmetrical movement* (United States Patent No. US5097252A). <https://patents.google.com/patent/US5097252A/en>
- Hecht, D., & Reiner, M. (2007). Field dependency and the sense of object-presence in haptic virtual environments. *Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, *10*(2), 243–251. <https://doi.org/10.1089/cpb.2006.9962>

- Heeter, C. (1992). Being There: The Subjective Experience of Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(2), 262–271. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.2.262>
- Heidegger, M. (1992). *Être et Temps*. Gallimard.
- Heilig, M. (1960). *Stereoscopic-television apparatus for individual use* (United States Patent No. US2955156A). <https://patents.google.com/patent/US2955156A/en>
- Heilig, M. (1962). *Sensorama simulator* (United States Patent No. US3050870A). <https://patents.google.com/patent/US3050870A/en>
- Held, R. M., & Durlach, N. I. (1992). Telepresence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 109–112. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.109>
- Hendrix, C., & Barfield, W. (1996a). Presence within virtual environments as a function of visual display parameters. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3), 274–289. <https://doi.org/10.1162/pres.1996.5.3.274>
- Hendrix, C., & Barfield, W. (1996b). The sense of presence within auditory virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3), 290–301. <https://doi.org/10.1162/pres.1996.5.3.290>
- Herrera, C. D. (2001). Ethics, deception, and “Those Milgram experiments.” *Journal of Applied Philosophy*, 18(3), 245–256. <https://doi.org/10.1111/1468-5930.00192>
- Hildebrandt, J., Schmitz, P., Calero Valdez, A., Kobbelt, L., & Ziefle, M. (2018). Get Well Soon! Human Factors’ Influence on Cybersickness After Redirected Walking Exposure in Virtual Reality. In J. Y. C. Chen & G. Fragomeni (Eds.), *Virtual, Augmented and Mixed Reality: Interaction, Navigation, Visualization, Embodiment, and Simulation* (pp. 82–101). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91581-4_7
- Ho, T. K. (1995). Random decision forests. *Proceedings of the Third International Conference on Document Analysis and Recognition (Volume 1) - Volume 1*, 278.
- Hobsbawm, E. J. (1994). *Age of extremes: The short twentieth century, 1914-1991*. Michael Joseph.
- Hobson, J. A., Hong, C. C.-H., & Friston, K. J. (2014). Virtual reality and consciousness inference in dreaming. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01133>
- Hoeft, F., Watson, C. L., Kesler, S. R., Bettinger, K. E., & Reiss, A. L. (2008). Gender differences in the mesocorticolimbic system during computer game-play. *Journal of Psychiatric Research*, 42(4), 253–258. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2007.11.010>
- Hoffman, H. G., Chambers, G. T., Meyer, W. J., Arceneaux, L. L., Russell, W. J., Seibel, E. J., Richards, T. L., Sharar, S. R., & Patterson, D. R. (2011). Virtual Reality as an Adjunctive Non-pharmacologic Analgesic for Acute Burn Pain During Medical Procedures. *Annals of*

- Behavioral Medicine : A Publication of the Society of Behavioral Medicine*, 41(2), 183–191.
<https://doi.org/10.1007/s12160-010-9248-7>
- Hoffman, H. G., Garcia-Palacios, A., Patterson, D. R., Jensen, M., Furness, T., & Ammons, W. F. (2001). The Effectiveness of Virtual Reality for Dental Pain Control: A Case Study. *CyberPsychology & Behavior*, 4(4), 527–535. <https://doi.org/10.1089/109493101750527088>
- Hoffman, H. G., Hollander, A., Schroder, K., Rousseau, S., & Furness, T. (1998). Physically touching and tasting virtual objects enhances the realism of virtual experiences. *Virtual Reality*, 3(4), 226–234. <https://doi.org/10.1007/BF01408703>
- Hoffman, H. G., Patterson, D. R., & Carrougher, G. J. (2000). Use of Virtual Reality for Adjunctive Treatment of Adult Burn Pain During Physical Therapy: A Controlled Study. *The Clinical Journal of Pain*, 16(3), 244–250.
- Hoffman, H. G., Patterson, D. R., Carrougher, G. J., & Sharar, S. R. (2001). Effectiveness of Virtual Reality–Based Pain Control With Multiple Treatments. *The Clinical Journal of Pain*, 17(3), 229–235.
- Hoffman, H. G., Patterson, D. R., Magula, J., Carrougher, G. J., Zeltzer, K., Dagadakis, S., & Sharar, S. R. (2004). Water-friendly virtual reality pain control during wound care. *Journal of Clinical Psychology*, 60(2), 189–195. <https://doi.org/10.1002/jclp.10244>
- Hoffman, H. G., Patterson, D. R., Seibel, E., Soltani, M., Jewett-Leahy, L., & Sharar, S. R. (2008). Virtual Reality Pain Control During Burn Wound Debridement in the Hydrotank. *The Clinical Journal of Pain*, 24(4), 299–304. <https://doi.org/10.1097/AJP.0b013e318164d2cc>
- Hoffman, H. G., Sharar, S. R., Coda, B., Everett, J. J., Ciol, M., Richards, T., & Patterson, D. R. (2004). Manipulating presence influences the magnitude of virtual reality analgesia. *Pain*, 111(1–2), 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.pain.2004.06.013>
- Horie, R., Wada, M., & Watanabe, E. (2018). Participation in a Virtual Reality Concert via Brainwave and Heartbeat. In W. Chung & C. S. Shin (Eds.), *Advances in Affective and Pleasurable Design* (pp. 276–284). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60495-4_30
- Horing, B., Weimer, K., Schrade, D., Muth, E. R., Scisco, J. L., Enck, P., & Klosterhalfen, S. (2013). Reduction of motion sickness with an enhanced placebo instruction: An experimental study with healthy participants. *Psychosomatic Medicine*, 75(5), 497–504. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e3182915ee7>
- Hosch, W. L. (2020). Ivan Edward Sutherland. In *Encyclopaedia Britannica*. Encyclopædia Britannica, Inc.

- How Beat Saber beat the odds. (2020). *TechCrunch*. <https://social.techcrunch.com/2019/05/08/how-beat-saber-beat-the-odds/>
- Howard, I. P., & Rogers, B. J. (2002). *Seeing in Depth: Depth perception*. I. Porteous.
- Howarth, P. A., & Hodder, S. G. (2008). Characteristics of habituation to motion in a virtual environment. *Displays*, 29(2), 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2007.09.009>
- Huang, G. Q., Yang, T. H., & Xu, S. (2014). *Application of Virtual Reality Technology in Teaching*. Applied Mechanics and Materials; Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.475-476.1230>
- Huang, H.-M., & Liaw, S.-S. (2018). An Analysis of Learners' Intentions Toward Virtual Reality Learning Based on Constructivist and Technology Acceptance Approaches. *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 19(1). <https://doi.org/10.19173/irrodl.v19i1.2503>
- Huang, H.-M., Rauch, U., & Liaw, S.-S. (2010). Investigating learners' attitudes toward virtual reality learning environments: Based on a constructivist approach. *Computers & Education*, 55(3), 1171–1182. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.05.014>
- Ijaz, K., Ahmadpour, N., Naismith, S. L., & Calvo, R. A. (2019). An Immersive Virtual Reality Platform for Assessing Spatial Navigation Memory in Predementia Screening: Feasibility and Usability Study. *JMIR Mental Health*, 6(9), e13887. <https://doi.org/10.2196/13887>
- IJsselsteijn, W. A., Ridder, H. de, Freeman, J., & Avons, S. E. (2000). Presence: Concept, determinants, and measurement. *Human Vision and Electronic Imaging V*, 3959, 520–529. <https://doi.org/10.1117/12.387188>
- IJsselsteijn, W. A., & Riva, G. (2003). Being there: The experience of presence in mediated environments. In *Being there: Concepts, effects and measurements of user presence in synthetic environments* (pp. 3–16). IOS Press.
- Indovina, P., Barone, D., Gallo, L., Chirico, A., De Pietro, G., & Giordano, A. (2018). Virtual Reality as a Distraction Intervention to Relieve Pain and Distress During Medical Procedures: A Comprehensive Literature Review. *The Clinical Journal of Pain*, 34(9), 858–877. <https://doi.org/10.1097/AJP.0000000000000599>
- Insko, B. E. (2003). Measuring presence: Subjective, behavioral and physiological methods. In *Being there: Concepts, effects and measurements of user presence in synthetic environments* (pp. 109–119). IOS Press.
- International Society for Presence Research. (2000). *The Concept of Presence: Explication Statement*. Retrieved 2018 from <https://ispr.info/>.

- Is VR safe for kids? We asked the experts.* (2016, April 23). Digital Trends. <https://www.digital-trends.com/virtual-reality/is-vr-safe-for-kids-we-asked-the-experts/>
- Iskander, J., Hossny, M., & Nahavandi, S. (2018). A Review on Ocular Biomechanic Models for Assessing Visual Fatigue in Virtual Reality. *IEEE Access*, 6, 19345–19361. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2815663>
- Ivan Sutherland—Head Mounted Display. (2018, April 22). <https://www.youtube.com/watch?v=NtwZXGprxag>
- Izard, S. G., Juanes, J. A., García Peñalvo, F. J., Estella, J. M. G., Ledesma, M. J. S., & Ruisoto, P. (2018). Virtual Reality as an Educational and Training Tool for Medicine. *Journal of Medical Systems*, 42(3), 50. <https://doi.org/10.1007/s10916-018-0900-2>
- Jackson, S. A., & Roberts, G. C. (1992). *Positive Performance States of Athletes: Toward a Conceptual Understanding of Peak Performance*. <https://doi.org/10.1123/tsp.6.2.156>
- James, W. (1890). *The Principles of Psychology* (Vol. 1).
- Jäncke, L., Cheetham, M., & Baumgartner, T. (2009). Virtual reality and the role of the prefrontal cortex in adults and children. *Frontiers in Neuroscience*, 3. <https://doi.org/10.3389/neuro.01.006.2009>
- Jansari, A. S., Devlin, A., Agnew, R., Akesson, K., Murphy, L., & Leadbetter, T. (2014). Ecological Assessment of Executive Functions: A New Virtual Reality Paradigm. *Brain Impairment*, 15(2), 71–87. <https://doi.org/10.1017/BrImp.2014.14>
- Jensen, L., & Konradsen, F. (2018). A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. *Education and Information Technologies*, 23(4), 1515–1529. <https://doi.org/10.1007/s10639-017-9676-0>
- Jerdan, S. W., Grindle, M., Woerden, H. C. van, & Boulos, M. N. K. (2018). Head-Mounted Virtual Reality and Mental Health: Critical Review of Current Research. *JMIR Serious Games*, 6(3), e14. <https://doi.org/10.2196/games.9226>
- Jia, S., Zhang, Q., & Li, S. (2014). Field dependence-independence modulates the efficiency of filtering out irrelevant information in a visual working memory task. *Neuroscience*, 278, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2014.07.075>
- Jin, S.-A. A. (2010). Does Imposing a Goal Always Improve Exercise Intentions in Avatar-Based Exergames? The Moderating Role of Interdependent Self-Construal on Exercise Intentions and Self-Presence. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 13(3), 335–339. <https://doi.org/10.1089/cyber.2009.0186>
- Jin, S.-A. A., & Park, N. (2009). Parasocial Interaction with My Avatar: Effects of Interdependent Self-Construal and the Mediating Role of Self-Presence in an Avatar-Based Console

- Game, Wii. *CyberPsychology & Behavior*, 12(6), 723–727.
<https://doi.org/10.1089/cpb.2008.0289>
- Johnson, D., Nacke, L. E., & Wyeth, P. (2015). All about that Base: Differing Player Experiences in Video Game Genres and the Unique Case of MOBA Games. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2265–2274.
<https://doi.org/10.1145/2702123.2702447>
- Johnson, J. D. (2004). Episodic memory and the hippocampus: Another view. *Medical Hypotheses*, 63(6), 963–967. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2004.04.017>
- Jones, C., Scholes, L., Johnson, D., Katsikitis, M., & Carras, M. C. (2014). Gaming well: Links between videogames and flourishing mental health. *Frontiers in Psychology*, 5.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00260>
- Jones, S. (2017). Disrupting the narrative: Immersive journalism in virtual reality. *Journal of Media Practice*, 18(2–3), 171–185. <https://doi.org/10.1080/14682753.2017.1374677>
- Jones, T., Moore, T., & Choo, J. (2016). The Impact of Virtual Reality on Chronic Pain. *PLoS One*, 11(12), e0167523. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167523>
- Juan, M. C., & Pérez, D. (2009). Comparison of the Levels of Presence and Anxiety in an Acrophobic Environment Viewed via HMD or CAVE. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 18(3), 232–248. <https://doi.org/10.1162/pres.18.3.232>
- Juul, J. (2010). *A Casual Revolution: Reinventing Video Games and Their Players*. MIT Press.
- Kaiser, P. K., Vasak, P., Suorineni, F. T., & Thibodeau, D. (2005). *New Dimensions in Seismic Data Interpretation with 3-D Virtual Reality Visualisation for Burst-Prone Mines* (pp. 33–45). Australian Centre for Geomechanics. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/574_0.3_Kaiser/
- Kamińska, D., Sapiński, T., Wiak, S., Tikk, T., Haamer, R. E., Avots, E., Helmi, A., Ozcinar, C., & Anbarjafari, G. (2019). Virtual Reality and Its Applications in Education: Survey. *Information*, 10(10), 318. <https://doi.org/10.3390/info10100318>
- Kanai, R., & Tsuchiya, N. (2012). Qualia. *Current Biology*, 22(10), R392–R396.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.03.033>
- Kapalo, K. A., Dewar, A. R., Rupp, M. A., & Szalma, J. L. (2015). Individual Differences in Video Gaming: Defining Hardcore Video Gamers. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 59(1), 878–881.
<https://doi.org/10.1177/1541931215591261>

- Kargar, M., Askari, S., Khoshaman, A., & Mohammadi, A. (2019). Differential diagnosis of schizophrenia and schizoaffective disorder from normal subjects using virtual reality. *Psychiatry Research*, 273, 378–386. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2019.01.037>
- Kastavelis, D., Mukherjee, M., Decker, L., & Stergiou, N. (2010a). Variability of lower extremity joint kinematics during backward walking in a virtual environment. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 14(2), 165–178.
- Kastavelis, D., Mukherjee, M., Decker, L., & Stergiou, N. (2010b). The Effect of Virtual Reality on Gait Variability. *Journal Articles*, 14(3), 239–256.
- Kavanagh, S., Luxton-Reilly, A., Wuensche, B., & Plimmer, B. (2017). A Systematic Review of Virtual Reality in Education. *Themes in Science and Technology Education*, 10(2), 85–119.
- Kennedy, R. S. (1975). Motion sickness questionnaire and field independence scores as predictors of success in naval aviation training. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 46(11), 1349–1352.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203–220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- Keppler, J. (2020). The Common Basis of Memory and Consciousness: Understanding the Brain as a Write–Read Head Interacting With an Omnipresent Background Field. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02968>
- Killane, I., Fearon, C., Newman, L., McDonnell, C., Waechter, S. M., Sons, K., Lynch, T., & Reilly, R. B. (2015). Dual Motor-Cognitive Virtual Reality Training Impacts Dual-Task Performance in Freezing of Gait. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 19(6), 1855–1861. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2015.2479625>
- Kilteni, K., Groten, R., & Slater, M. (2012). The Sense of Embodiment in Virtual Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21(4), 373–387. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00124
- Kim, H., Shin, J. E., Hong, Y.-J., Shin, Y.-B., Shin, Y. S., Han, K., Kim, J.-J., & Choi, S.-H. (2017). Aversive eye gaze during a speech in virtual environment in patients with social anxiety disorder: *Australian & New Zealand Journal of Psychiatry*. <https://doi.org/10.1177/0004867417714335>
- Kim, Kangsoo, Schubert, R., & Welch, G. (2016). Exploring the Impact of Environmental Effects on Social Presence with a Virtual Human. In D. Traum, W. Swartout, P. Khooshabeh, S.

- Kopp, S. Scherer, & A. Leuski (Eds.), *Intelligent Virtual Agents, Iva 2016* (Vol. 10011, pp. 470–474). Springer-Verlag Berlin.
- Kim, Kwanguk, Rosenthal, M. Z., Zielinski, D., & Brady, R. (2012). Comparison of desktop, head mounted display, and six wall fully immersive systems using a stressful task. *2012 IEEE Virtual Reality Workshops (VRW)*, 143–144. <https://doi.org/10.1109/VR.2012.6180922>
- Kim, Kyungwan, & Bock, O. (2020). Acquisition of landmark, route, and survey knowledge in a wayfinding task: In stages or in parallel? *Psychological Research*. <https://doi.org/10.1007/s00426-020-01384-3>
- Kim, O., Pang, Y., & Kim, J.-H. (2019). The effectiveness of virtual reality for people with mild cognitive impairment or dementia: A meta-analysis. *BMC Psychiatry*, 19. <https://doi.org/10.1186/s12888-019-2180-x>
- Kim, T., & Biocca, F. (1997). Telepresence via Television: Two Dimensions of Telepresence May Have Different Connections to Memory and Persuasion. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2), 0–0. <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00073.x>
- Kim, Y. M., Rhiu, I., & Yun, M. H. (2020). A Systematic Review of a Virtual Reality System from the Perspective of User Experience. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 36(10), 893–910. <https://doi.org/10.1080/10447318.2019.1699746>
- Kim, Y. Y., Kim, H. J., Kim, E. N., Ko, H. D., & Kim, H. T. (2005). Characteristic changes in the physiological components of cybersickness. *Psychophysiology*, 42(5), 616–625. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2005.00349.x>
- Kjeldskov, J. (2001). Interaction: Full and partial Immersive Virtual Reality Displays. *Proceedings of IRIS24*, 587–600.
- Knight, M. M., & Arns, L. L. (2006). The Relationship Among Age and Other Factors on Incidence of Cybersickness in Immersive Environment Users. *ACM SIGGRAPH 2006 Research Posters*. <https://doi.org/10.1145/1179622.1179846>
- Knudsen, E. I. (2007). Fundamental Components of Attention. *Annual Review of Neuroscience*, 30(1), 57–78. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.30.051606.094256>
- Kober, S. E., Kurzmann, J., & Neuper, C. (2012). Cortical correlate of spatial presence in 2D and 3D interactive virtual reality: An EEG study. *International Journal of Psychophysiology*, 83(3), 365–374. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.12.003>
- Kober, S. E., & Neuper, C. (2013). Personality and Presence in Virtual Reality: Does Their Relationship Depend on the Used Presence Measure? *International Journal of Human-Computer Interaction*, 29(1), 13–25. <https://doi.org/10.1080/10447318.2012.668131>

- Koch, S. C., Müller, S. M., & Sieverding, M. (2008). *Women and computers. Effects of stereotype threat on attribution of failure*. 9.
- Kong, G., He, K., & Wei, K. (2017). Sensorimotor experience in virtual reality enhances sense of agency associated with an avatar. *Consciousness and Cognition*, 52, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2017.04.018>
- Kool, H. (2016). The Ethics of Immersive Journalism: A rhetorical analysis of news storytelling with virtual reality technology. *Intersect: The Stanford Journal of Science, Technology, and Society*, 9(3), Article 3. <http://ojs.stanford.edu/ojs/index.php/intersect/article/view/871>
- Kopp, B., Steinke, A., Bertram, M., Skripuletz, T., & Lange, F. (2019). Multiple Levels of Control Processes for Wisconsin Card Sorts: An Observational Study. *Brain Sciences*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/brainsci9060141>
- Kordyaka, B. (2018). Digital Poison “ Approaching a Theory of Toxic Behavior in MOBA games. *ICIS 2018 Proceedings*. <https://aisel.aisnet.org/icis2018/behavior/Presentations/18>
- Kowert, R., Breuer, J., Quandt, T., Breuer, J., & Quandt, T. (2017, February 10). *Women Are From FarmVille, Men Are From ViceCity: The Cycle of Exclusion and Sexism in Video Game Content and Culture*. New Perspectives on the Social Aspects of Digital Gaming; Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315629308-9>
- Krasniewicz, L. (2000). Immersive imaging technologies for archaeological research. *BAR INTERNATIONAL SERIES*.
- Krueger, M. W. (1991). *Artificial Reality II* (Reading MA, Addison-Wesley).
- Krueger, M. W., Gionfriddo, T., & Hinrichsen, K. (1985). VIDEOPLACE—an artificial reality. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 35–40. <https://doi.org/10.1145/317456.317463>
- Kuittinen, J., Kultima, A., Niemelä, J., & Paavilainen, J. (2007). Casual games discussion. *Proceedings of the 2007 Conference on Future Play*, 105–112. <https://doi.org/10.1145/1328202.1328221>
- Kupin, A., Moeller, B., Jiang, Y., Banerjee, N. K., & Banerjee, S. (2019). Task-Driven Biometric Authentication of Users in Virtual Reality (VR) Environments. In I. Kompatsiaris, B. Huet, V. Mezaris, C. Gurrin, W.-H. Cheng, & S. Vrochidis (Eds.), *MultiMedia Modeling* (pp. 55–67). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05710-7_5
- La salle de réalité virtuelle du CIREVE - Université de Caen Normandie*. (2016, March 21). <https://www.youtube.com/watch?v=IAIQgIENYuc>
- Laarni, J., Ravaja, N., & Saari, T. (2003). Using eye tracking and psychophysiological methods to study spatial presence. *Annual International Workshop on Presence, USA, 2003*.

- [https://research.aalto.fi/en/publications/using-eye-tracking-and-psychophysiological-methods-to-study-spatial-presence\(a00cc553-b6b1-4a96-93b5-318dfc8e983f\).html](https://research.aalto.fi/en/publications/using-eye-tracking-and-psychophysiological-methods-to-study-spatial-presence(a00cc553-b6b1-4a96-93b5-318dfc8e983f).html)
- Laarni, J., Ravaja, N., Saari, T., Böcking, S., Hartmann, T., & Schramm, H. (2015). Ways to measure spatial presence: Review and future directions. *Immersed in Media: Telepresence Theory, Measurement & Technology*, 139–185. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10190-3_8
- Labbe, P. (2017, May 17). Cinéma en réalité virtuelle: Le festival de Cannes lui fait une place de choix. *Réalité-Virtuelle.com*. <https://www.realite-virtuelle.com/cinema-vr-festival-de-cannes-1705/>
- LaBerge, D. (1995). *Attentional Processing: The Brain's Art of Mindfulness* (1 edition). Harvard University Press.
- Lachlan, K., & Krmar, M. (2011). Experiencing Presence in Video Games: The Role of Presence Tendencies, Game Experience, Gender, and Time Spent in Play. *Communication Research Reports*, 28(1), 27–31. <https://doi.org/10.1080/08824096.2010.518924>
- Laframboise, M.-R., Bouchard, S., Larouche, S., Robillard, G., & Renaud, P. (2006). Relation between anxiety and feeling of presence during virtual reality immersion. *Cyberpsychology & Behavior*, 9(6), 689–690.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). *Metaphors We Live By*. University of Chicago Press. <https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/M/bo3637992.html>
- L'amour à Rome [3D]—Les Nocturnes du Plan de Rome—02 oct. 19.* (2018, April 22). https://www.youtube.com/watch?v=zH4_6irrhxk
- Lange, F., Brückner, C., Knebel, A., Seer, C., & Kopp, B. (2018). Executive dysfunction in Parkinson's disease: A meta-analysis on the Wisconsin Card Sorting Test literature. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 93, 38–56. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.06.014>
- Lanier, J. (2017). *Dawn of the new everything: A journey through virtual reality*. Bodley Head.
- Larousse, É. (2020). *Définitions: Présence - Dictionnaire de français Larousse*. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/pr%C3%A9sence/63686>
- Laver, K. E., George, S., Thomas, S., Deutsch, J. E., & Crotty, M. (2015). Virtual reality for stroke rehabilitation. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2, CD008349. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD008349.pub3>
- Laver, K. E., Lange, B., George, S., Deutsch, J. E., Saposnik, G., & Crotty, M. (2017). Virtual reality for stroke rehabilitation. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 11, CD008349. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD008349.pub4>

- LaViola, J. J. (2000). A discussion of cybersickness in virtual environments. *ACM SIGCHI Bulletin*, 32(1), 47–56. <https://doi.org/10.1145/333329.333344>
- Laws, A. L. S. (2020). Can Immersive Journalism Enhance Empathy? *Digital Journalism*, 8(2), 213–228. <https://doi.org/10.1080/21670811.2017.1389286>
- Lazar, I. & P., Ion Ovidiu. (2018). *Understanding the role of modern technologies in education: A scoping review protocol*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1788345>
- Lecouvey, G., Morand, A., Gonneaud, J., Piolino, P., Orriols, E., Pélerin, A., Ferreira Da Silva, L., de La Sayette, V., Eustache, F., & Desgranges, B. (2019). An Impairment of Prospective Memory in Mild Alzheimer’s Disease: A Ride in a Virtual Town. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00241>
- Lee, A. Y., & Sternthal, B. (1999). The Effects of Positive Mood on Memory. *Journal of Consumer Research*, 26(2), 115–127. <https://doi.org/10.1086/209554>
- Lee, K. M. (2004). Presence, explicated. *Communication Theory*, 14(1), 27–50. <https://doi.org/10.1093/ct/14.1.27>
- Lemley, M. A., & Volokh, E. (2018). *Law, Virtual Reality, and Augmented Reality* (SSRN Scholarly Paper ID 2933867). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2933867>
- Leng, Y., Huang, J., Chen, C.-C., Sun, Q., & Zhu, Y. (2020). Energy-Efficient Video Processing for Virtual Reality. *IEEE Micro*, 40(3), 30–36. <https://doi.org/10.1109/MM.2020.2985692>
- Leone, C., Feys, P., Moumdjian, L., D’Amico, E., Zappia, M., & Patti, F. (2017). Cognitive-motor dual-task interference: A systematic review of neural correlates. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 75, 348–360. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.01.010>
- Lessiter, J., Freeman, J., Keogh, E., & Davidoff, J. (2001). A Cross-Media Presence Questionnaire: The ITC-Sense of Presence Inventory. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 282–297. <https://doi.org/10.1162/105474601300343612>
- Leung, T., Zulkernine, F., & Isah, H. (2018). The use of Virtual Reality in Enhancing Interdisciplinary Research and Education. *ArXiv:1809.08585 [Cs]*. <http://arxiv.org/abs/1809.08585>
- Levac, D. E., Huber, M. E., & Sternad, D. (2019). Learning and transfer of complex motor skills in virtual reality: A perspective review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 16(1), 121. <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0587-8>
- Levine, M. E., Stern, R. M., & Koch, K. L. (2006). The effects of manipulating expectations through placebo and nocebo administration on gastric tachyarrhythmia and motion-induced nausea. *Psychosomatic Medicine*, 68(3), 478–486. <https://doi.org/10.1097/01.psy.0000221377.52036.50>

- Levine, S. C., Foley, A., Lourenco, S., Ehrlich, S., & Ratliff, K. (2016). Sex differences in spatial cognition: Advancing the conversation. *WIREs Cognitive Science*, 7(2), 127–155. <https://doi.org/10.1002/wcs.1380>
- Li, A., Montaña, Z., Chen, V. J., & Gold, J. I. (2011). Virtual reality and pain management: Current trends and future directions. *Pain Management*, 1(2), 147–157. <https://doi.org/10.2217/pmt.10.15>
- Li, Y., & Zhao, M. (2019). Effects of the presence of others on prosocial behavior: Perceived face as mediator. *Asian Journal of Social Psychology*, 22(2), 193–202. <https://doi.org/10.1111/ajsp.12358>
- Liebold, B., Brill, M., Pietschmann, D., Schwab, F., & Ohler, P. (2017). Continuous Measurement of Breaks in Presence: Psychophysiology and Orienting Responses. *Media Psychology*, 20(3), 477–501. <https://doi.org/10.1080/15213269.2016.1206829>
- Ling, Y., Nefs, H. T., Brinkman, W.-P., Qu, C., & Heynderickx, I. (2013). The relationship between individual characteristics and experienced presence. *Computers in Human Behavior*, 29(4), 1519–1530. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.12.010>
- Ling, Y., Nefs, H. T., Morina, N., Heynderickx, I., & Brinkman, W.-P. (2014). A Meta-Analysis on the Relationship between Self-Reported Presence and Anxiety in Virtual Reality Exposure Therapy for Anxiety Disorders. *Plos One*, 9(5), e96144. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096144>
- Littré—Performances—Définition, citations, étymologie.* (2020). <https://www.littre.org/definition/performances>
- Lobo, L., Heras-Escribano, M., & Travieso, D. (2018). The History and Philosophy of Ecological Psychology. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02228>
- Lombard, M., & Ditton, T. (1997). At the Heart of It All: The Concept of Presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2), 0–0. <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00072.x>
- Lombard, M., & Jones, M. (2004). *Presence and sexuality*. 28–35.
- Lombard, M., & Jones, M. T. (2007). Identifying the (Tele)Presence Literature. *PsychNology Journal*, 5(2), 197–206.
- Loomis, J. M. (1992). Distal attribution and presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 113–119.
- Loomis, J. M. (2016). Presence in Virtual Reality and Everyday Life: Immersion within a World of Representation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 25(2), 169–174. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00255

- Lowood, H. (2020). Virtual reality. In *Encyclopædia Britannica*. Encyclopædia Britannica, Inc.
- Ma, R., & Kaber, D. B. (2006). Presence, workload and performance effects of synthetic environment design factors. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64(6), 541–552. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2005.12.003>
- Madary, M., & Metzinger, T. K. (2016). Real Virtuality: A Code of Ethical Conduct. Recommendations for Good Scientific Practice and the Consumers of VR-Technology. *Frontiers in Robotics and AI*, 3. <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00003>
- Madl, T., Chen, K., Montaldi, D., & Trapp, R. (2015). Computational cognitive models of spatial memory in navigation space: A review. *Neural Networks*, 65, 18–43. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2015.01.002>
- Maggio, M. G., Maresca, G., De Luca, R., Stagnitti, M. C., Porcari, B., Ferrera, M. C., Galletti, F., Casella, C., Manuli, A., & Calabrò, R. S. (2019). The Growing Use of Virtual Reality in Cognitive Rehabilitation: Fact, Fake or Vision? A Scoping Review. *Journal of the National Medical Association*, 111(4), 457–463. <https://doi.org/10.1016/j.jnma.2019.01.003>
- Mahboobin, A., Loughlin, P. J., Redfern, M. S., & Sparto, P. J. (2005). Sensory re-weighting in human postural control during moving-scene perturbations. *Experimental Brain Research*, 167(2), 260–267. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0053-7>
- Mahon, B. Z. (2015). What is embodied about cognition? *Language, Cognition and Neuroscience*, 30(4), 420–429. <https://doi.org/10.1080/23273798.2014.987791>
- Mahrer, N. E., & Gold, J. I. (2009). The use of virtual reality for pain control: A review. *Current Pain and Headache Reports*, 13(2), 100–109. <https://doi.org/10.1007/s11916-009-0019-8>
- Mailat, M. (2008). Rubrique—Le virtuel, le réel et l'actuel. *Informations sociales*, n° 147(3), 90–91.
- Makowski, D., Sperduti, M., Nicolas, S., & Piolino, P. (2017). “Being there” and remembering it: Presence improves memory encoding. *Consciousness and Cognition*, 53, 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2017.06.015>
- Malbos, E., Rapee, R. M., & Kavakli, M. (2012). Behavioral Presence Test in Threatening Virtual Environments. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 21(3), 268–280.
- Malloy, K. M., & Milling, L. S. (2010). The effectiveness of virtual reality distraction for pain reduction: A systematic review. *Clinical Psychology Review*, 30(8), 1011–1018. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2010.07.001>
- Maneuvrier, A. (2020a). *Spatioprésence*. <https://arthurmaneuvrier.com/spatio.mp4>
- Maneuvrier, A. (2020b). *Starwalker*. <https://arthurmaneuvrier.com/classic/starwalker.html>
- Maneuvrier, A. (2020c). *Virtual reality and neurosciences*. <https://arthurmaneuvrier.com/>

- Maneuvrier, A., Decker, L. M., Ceyte, H., Fleury, P., & Renaud, P. (2020). Presence promotes performance on a virtual spatial cognition task: Impact of human factors on virtual reality assessment. *Frontiers in Virtual Reality*, 1. <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.571713>
- Manjrekar, S., Sandilya, S., Bhosale, D., Kanchi, S., Pitkar, A., & Gondhalekar, M. (2014). CAVE: An Emerging Immersive Technology -- A Review. *2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation*. <https://doi.org/10.1109/UKSim.2014.20>
- Manning, L. (1975). *The Man Who Awoke* (First Ed Thus edition). Ballantine Books.
- Mantovani, F., & Castelnuovo, G. (2003). *The Sense of Presence in Virtual Training: Enhancing Skills Acquisition and Transfer of Knowledge through Learning Experience in Virtual Environments* (pp. 167–182). IOS Press. <https://publicatt.unicatt.it/handle/10807/32450>
- Mantovani, F., Castelnuovo, G., Gaggioli, A., & Riva, G. (2003). Virtual reality training for health-care professionals. *Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, 6(4), 389–395. <https://doi.org/10.1089/109493103322278772>
- Mantovani, G., & Riva, G. (1999). “Real” Presence: How Different Ontologies Generate Different Criteria for Presence, Telepresence, and Virtual Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 540–550. <https://doi.org/10.1162/105474699566459>
- Maples-Keller, J. L., Yasinski, C., Manjin, N., & Rothbaum, B. O. (2017). Virtual Reality-Enhanced Extinction of Phobias and Post-Traumatic Stress. *Neurotherapeutics: The Journal of the American Society for Experimental NeuroTherapeutics*, 14(3), 554–563. <https://doi.org/10.1007/s13311-017-0534-y>
- Marchetti, G. (2012). Against the View that Consciousness and Attention are Fully Dissociable. *Frontiers in Psychology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00036>
- Martín, F. M. del P. (2009). The thermodynamics of human reaction times. *ArXiv:0908.3170 [Cond-Mat, q-Bio]*. <http://arxiv.org/abs/0908.3170>
- Martire, A. da S. (2014). DOMUS: Cyber-Archeology in Three-Dimensional Virtual Environment. *2014 XVI Symposium on Virtual and Augmented Reality*, 148–155. <https://doi.org/10.1109/SVR.2014.15>
- Massé, B., Ba, S., & Horaud, R. (2018). Tracking Gaze and Visual Focus of Attention of People Involved in Social Interaction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 40(11), 2711–2724. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2017.2782819>

- Matsangas, P., McCauley, M. E., & Becker, W. (2014). The effect of mild motion sickness and sopite syndrome on multitasking cognitive performance. *Human Factors*, 56(6), 1124–1135. <https://doi.org/10.1177/0018720814522484>
- McArthur, D. (2009). Good Ethics Can Sometimes Mean Better Science: Research Ethics and the Milgram Experiments. *Science and Engineering Ethics*, 15(1), 69–79. <https://doi.org/10.1007/s11948-008-9083-4>
- Meehan, M. (2001). *Physiological reaction as an objective measure of presence in virtual environments: Vol. Doctoral Dissertation*. University of North Carolina at Chapel Hill.
- Meehan, M., Insko, B., Whitton, M., & Brooks, F. P. (2002). Physiological measures of presence in stressful virtual environments. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3), 645–652. <https://doi.org/10.1145/566654.566630>
- Merleau-Ponty, M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Editions Gallimard.
- Messick, S. (1976). Individuality in learning. In *Personality consistencies in cognition and creativity* (S. Messick, pp. 4–23). Jossey-Bass.
- Mestre, D., Fuchs, P., Berthoz, A., & Vercher, J. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle* (3rd ed., pp. 309–338). Ecole des mines.
- Mestre, D. R. (2017). CAVE versus Head-Mounted Displays: Ongoing thoughts. *Electronic Imaging*, 2017(3), 31–35. <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2017.3.ERVR-094>
- Mikropoulos, T. A., & Natsis, A. (2011). Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999–2009). *Computers & Education*, 56(3), 769–780. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.10.020>
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). *A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*.
- Milgram, S. (1963). Behavioral study of obedience. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 67, 371–378.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81–97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>
- Miloff, A., Lindner, P., Dafgård, P., Deak, S., Garke, M., Hamilton, W., Heinsoo, J., Kristoffersson, G., Rafi, J., Sindemark, K., Sjölund, J., Zenger, M., Reuterskiöld, L., Andersson, G., & Carlbring, P. (2019). Automated virtual reality exposure therapy for spider phobia vs. in-vivo one-session treatment: A randomized non-inferiority trial. *Behaviour Research and Therapy*, 118, 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.brat.2019.04.004>
- Minderer, M., Harvey, C. D., Donato, F., & Moser, E. I. (2016). Virtual reality explored. *Nature*, 533(7603), 324–325. <https://doi.org/10.1038/nature17899>

- Minsky, M. (1980). Telepresence. *Omni*, 45–51.
- Mioduser, D., Trabasso, T., Sabatini, J., Massaro, D. W., Calfee, R. C., & Venezky, R. L. (2002). *From real virtuality in Lascaux to virtual reality today: Cognitive processes with cognitive technologies*.
- Mirelman, A., Maidan, I., Herman, T., Deutsch, J. E., Giladi, N., & Hausdorff, J. M. (2011). Virtual Reality for Gait Training: Can It Induce Motor Learning to Enhance Complex Walking and Reduce Fall Risk in Patients With Parkinson's Disease? *Journals of Gerontology Series A-Biological Sciences and Medical Sciences*, 66(2), 234–240. <https://doi.org/10.1093/gerona/glq201>
- Mitrousia, V., & Giotakos, O. (2016). [Virtual reality therapy in anxiety disorders]. *Psychiatrike = Psychiatriki*, 27(4), 276–286. <https://doi.org/10.22365/jpsych.2016.274.276>
- Moffat, S. D., Hampson, E., & Hatzipantelis, M. (1998). Navigation in a “Virtual” Maze: Sex Differences and Correlation With Psychometric Measures of Spatial Ability in Humans. *Evolution and Human Behavior*, 19(2), 73–87. [https://doi.org/10.1016/S1090-5138\(97\)00104-9](https://doi.org/10.1016/S1090-5138(97)00104-9)
- Moller, H. J., & Barbera, J. (2009). Media Presence, Consciousness and Dreaming. In Giuseppe Riva, M. T. Anguera, B. K. Wiederhold, & F. Mantovani (Eds.), *From Communication to Presence: Cognition, Emotions and Culture Towards the Ultimate Communicative Experience: Festschrift in Honor of Luigi Anolli* (Vol. 9, pp. 96–122). Ios Press.
- Montello, D. R., Lovelace, K. L., Golledge, R. G., & Self, C. M. (1999). Sex-Related Differences and Similarities in Geographic and Environmental Spatial Abilities. *Annals of the Association of American Geographers*, 89(3), 515–534. <https://doi.org/10.1111/0004-5608.00160>
- Montes, G. A. (2018). Virtual Reality for Non-Ordinary Consciousness. *Frontiers in Robotics and AI*, 5. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00007>
- Moore, G. (1965). Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38(8), 114.
- Moore, H. F., & Gheisari, M. (2019). A Review of Virtual and Mixed Reality Applications in Construction Safety Literature. *Safety*, 5(3), 51. <https://doi.org/10.3390/safety5030051>
- Moore, J. W. (2016). What Is the Sense of Agency and Why Does it Matter? *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01272>
- Mora-Cantalops, M., & Sicilia, M.-Á. (2018). MOBA games: A literature review. *Entertainment Computing*, 26, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2018.02.005>
- Mori, M., MacDorman, K. F., & Kageki, N. (2012). The Uncanny Valley [From the Field]. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 19(2), 98–100. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>

- Morin, A. (2011). Self-Awareness Part 1: Definition, Measures, Effects, Functions, and Antecedents. *Social and Personality Psychology Compass*, 5(10), 807–823. <https://doi.org/10.1111/j.1751-9004.2011.00387.x>
- Morin, C. (2011). Neuromarketing: The New Science of Consumer Behavior. *Society*, 48(2), 131–135. <https://doi.org/10.1007/s12115-010-9408-1>
- Morina, N., Brinkman, W.-P., Hartanto, D., & Emmelkamp, P. M. G. (2014). Sense of presence and anxiety during virtual social interactions between a human and virtual humans. *PeerJ*, 2, e337. <https://doi.org/10.7717/peerj.337>
- Motejlek, J., & Alpay, E. (2019). A Taxonomy for Virtual and Augmented Reality in Education. *ArXiv:1906.12051 [Cs]*. <http://arxiv.org/abs/1906.12051>
- Mraz, R., Hong, J., Quintin, G., Staines, W. R., McIlroy, W. E., Zakzanis, K. K., & Graham, S. J. (2003). A Platform for Combining Virtual Reality Experiments with Functional Magnetic Resonance Imaging. *CyberPsychology & Behavior*, 6(4), 359–368. <https://doi.org/10.1089/109493103322278736>
- Muhanna, M. A. (2015). Virtual reality and the CAVE: Taxonomy, interaction challenges and research directions. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 27(3), 344–361. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2014.03.023>
- Munafo, J., Diedrick, M., & Stoffregen, T. A. (2017). The virtual reality head-mounted display Oculus Rift induces motion sickness and is sexist in its effects. *Experimental Brain Research*, 235(3), 889–901. <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4846-7>
- Muratore, M., Tuena, C., Pedroli, E., Cipresso, P., & Riva, G. (2019). Virtual Reality as a Possible Tool for the Assessment of Self-Awareness. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 13, 62. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2019.00062>
- Murias, K., Kwok, K., Castillejo, A. G., Liu, I., & Iaria, G. (2016). The effects of video game use on performance in a virtual navigation task. *Computers in Human Behavior*, 58, 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.01.020>
- Murphy, E. R., Illes, J., & Reiner, P. B. (2008). Neuroethics of neuromarketing. *Journal of Consumer Behaviour*, 7(4–5), 293–302. <https://doi.org/10.1002/cb.252>
- Musser, G. (2018, October 24). How virtual reality is transforming autism studies. *Spectrum | Autism Research News*. <https://www.spectrumnews.org/features/deep-dive/virtual-reality-transforming-autism-studies/>
- Nadler, R. T., Rabi, R., & Minda, J. P. (2010). Better Mood and Better Performance: Learning Rule-Described Categories Is Enhanced by Positive Mood. *Psychological Science*, 21(12), 1770–1776. <https://doi.org/10.1177/0956797610387441>

- Naik, H., Bastien, R., Navab, N., & Couzin, I. D. (2020). Animals in Virtual Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(5), 2073–2083. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2973063>
- Nakamura, J., & Csikszentmihalyi, M. (2009). The Concept of Flow. In *Oxford handbook of positive psychology* (pp. 89–105). Oxford University Press.
- Nalivaiko, E., Davis, S. L., Blackmore, K. L., Vakulin, A., & Nesbitt, K. V. (2015). Cybersickness provoked by head-mounted display affects cutaneous vascular tone, heart rate and reaction time. *Physiology & Behavior*, 151, 583–590. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.08.043>
- Nash, E. B., Edwards, G. W., Thompson, J. A., & Barfield, W. (2000). A Review of Presence and Performance in Virtual Environments. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 12(1), 1–41.
- Navon, D., & Gopher, D. (1977). *On the Economy of the Human Processing System: A Model of Multiple Capacity*. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.86.3.214>
- Navon, D., & Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3), 214–255. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.86.3.214>
- Nederkoorn, C., Guerrieri, R., Havermans, R. C., Roefs, A., & Jansen, A. (2009). The interactive effect of hunger and impulsivity on food intake and purchase in a virtual supermarket. *International Journal of Obesity*, 33(8), 905–912. <https://doi.org/10.1038/ijo.2009.98>
- Nitsch, J. R., & Hackfort, D. (2016). Chapter 2 - Theoretical Framework of Performance Psychology: An Action Theory Perspective. In M. Raab, B. Lobinger, S. Hoffmann, A. Pizzera, & S. Laborde (Eds.), *Performance Psychology* (pp. 11–29). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803377-7.00002-8>
- Noghabaei, M., Heydarian, A., Balali, V., & Han, K. (2020). Trend Analysis on Adoption of Virtual and Augmented Reality in the Architecture, Engineering, and Construction Industry. *Data*, 5(1), 26. <https://doi.org/10.3390/data5010026>
- Nolin, P., Banville, F., Cloutier, J., & Allain, P. (2013). Virtual Reality as a New Approach to Assess Cognitive Decline in the Elderly. *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*, 2(8), 612.
- North, M. M., & North, S. (2016). A Comparative Study of Sense of Presence of Traditional Virtual Reality and Immersive Environments. *Australasian Journal of Information Systems*, 20.
- Nowak, K. L., & Biocca, F. (2003). The Effect of the Agency and Anthropomorphism on Users' Sense of Telepresence, Copresence, and Social Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 12, 481–494. <https://doi.org/10.1162/105474603322761289>

- Nunez, M. V., Avizzano, C. A., Ruffaldi, E., & Bergamasco, M. (2010). Human Gait Recognition for Virtual Environments Exploration. *2010 Ieee Ro-Man*.
- Ochs, M., Jain, S., & Blache, P. (2018). Toward an Automatic Prediction of the Sense of Presence in Virtual Reality Environment. *Proceedings of the 6th International Conference on Human-Agent Interaction*, 161–166. <https://doi.org/10.1145/3284432.3284452>
- Ohno, N., Kageyama, A., & Kusano, K. (2006). Virtual reality visualization by CAVE with VFIVE and VTK. *Journal of Plasma Physics*, 72(6), 1069–1072. <https://doi.org/10.1017/S0022377806005253>
- Oing, T., & Prescott, J. (2018). Implementations of Virtual Reality for Anxiety-Related Disorders: Systematic Review. *JMIR Serious Games*, 6(4), e10965. <https://doi.org/10.2196/10965>
- Oliveira, J., Gamito, P., Alghazzawi, D. M., Fardoun, H. M., Rosa, P. J., Sousa, T., Picareli, L. F., Morais, D., & Lopes, P. (2017). Performance on naturalistic virtual reality tasks depends on global cognitive functioning as assessed via traditional neurocognitive tests. *Applied Neuropsychology. Adult*, 1–7. <https://doi.org/10.1080/23279095.2017.1349661>
- O'Neil, O., Fernandez, M. M., Herzog, J., Beorchia, M., Gower, V., Gramatica, F., Starrost, K., & Kiwull, L. (2018). Virtual Reality for Neurorehabilitation: Insights From 3 European Clinics. *PM & R: The Journal of Injury, Function, and Rehabilitation*, 10(9 Suppl 2), S198–S206. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2018.08.375>
- Onyekuru, B. U. (2015). Field Dependence-Field Independence Cognitive Style, Gender, Career Choice and Academic Achievement of Secondary School Students in Emohua Local Government Area of Rivers State. *Journal of Education and Practice*, 6(10), 76-85–85.
- O'Regan, J. K., & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 939–973. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01000115>
- Page, R. L. (2000). Brief history of flight simulation. *SimTecT 2000 Proceedings*, 11–17.
- Paillard, A. C., Quarck, G., Paolino, F., Denise, P., Paolino, M., Golding, J. F., & Ghulyan-Bedikian, V. (2013). Motion sickness susceptibility in healthy subjects and vestibular patients: Effects of gender, age and trait-anxiety. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, 23(4–5), 203–209. <https://doi.org/10.3233/VES-130501>
- Pallamin, N., & Bossard, C. (2016). Presence, Behavioural Realism and Performances in Driving Simulation. *Ifac Papersonline*, 49(19), 408–413. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.600>

- Pallavicini, F., Argenton, L., Toniuzzi, N., Aceti, L., & Mantovani, F. (2016). Virtual Reality Applications for Stress Management Training in the Military. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 87(12), 1021–1030. <https://doi.org/10.3357/AMHP.4596.2016>
- Pallavicini, F., Ferrari, A., & Mantovani, F. (2018). Video Games for Well-Being: A Systematic Review on the Application of Computer Games for Cognitive and Emotional Training in the Adult Population. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02127>
- Pan, X., & Hamilton, A. F. de C. (2018). Why and how to use virtual reality to study human social interaction: The challenges of exploring a new research landscape. *British Journal of Psychology*, 109(3), 395–417. <https://doi.org/10.1111/bjop.12290>
- Pantelidis, V. S. (2009). Reasons to Use Virtual Reality in Education and Training Courses and a Model to Determine When to Use Virtual Reality. *Themes in Science and Technology Education*, 2, 59–70.
- Park, J. L., Dudchenko, P. A., & Donaldson, D. I. (2018). Navigation in Real-World Environments: New Opportunities Afforded by Advances in Mobile Brain Imaging. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00361>
- Parsons, T. D. (2015). Virtual Reality for Enhanced Ecological Validity and Experimental Control in the Clinical, Affective and Social Neurosciences. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00660>
- Parsons, T. D., Gaggioli, A., & Riva, G. (2017). Virtual Reality for Research in Social Neuroscience. *Brain Sciences*, 7(4), 42. <https://doi.org/10.3390/brainsci7040042>
- Parsons, T. D., Larson, P., Kratz, K., Thiebaut, M., Bluestein, B., Buckwalter, J. G., & Rizzo, A. A. (2004). Sex differences in mental rotation and spatial rotation in a virtual environment. *Neuropsychologia*, 42(4), 555–562.
- Patney, A., Salvi, M., Kim, J., Kaplanyan, A., Wyman, C., Benty, N., Luebke, D., & Lefohn, A. (2016). Towards foveated rendering for gaze-tracked virtual reality. *ACM Transactions on Graphics*, 35(6), 179:1–179:12. <https://doi.org/10.1145/2980179.2980246>
- Pattenden, M. (2018, May 5). A new reality: Could VR revive the amusement arcade? *The Observer*. <https://www.theguardian.com/business/2018/may/05/vr-new-reality-revive-amusement-arcade>
- Patterson, D. R., Wiechman, S. A., Jensen, M., & Sharar, S. R. (2006). Hypnosis delivered through immersive virtual reality for burn pain: A clinical case series. *International Journal of Clinical and Experimental Hypnosis*, 54(2), 130–142. <https://doi.org/10.1080/00207140500528182>

- Patterson, David R., Jensen, M. P., Wiechman, S. A., & Sharar, S. R. (2010). Virtual Reality Hypnosis for Pain Associated With Recovery From Physical Trauma. *International Journal of Clinical and Experimental Hypnosis*, 58(3), 288–300. <https://doi.org/10.1080/00207141003760595>
- Pausch, R., Pausch, R., Proffitt, D., & Williams, G. (1997). Quantifying Immersion in Virtual Reality. *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 13–18. <https://doi.org/10.1145/258734.258744>
- Pavlou, M., Quinn, C., Murray, K., Spyridakou, C., Faldon, M., & Bronstein, A. M. (2011). The effect of repeated visual motion stimuli on visual dependence and postural control in normal subjects. *Gait & Posture*, 33(1), 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.10.085>
- Penumudi, S. A., Kuppam, V. A., Kim, J. H., & Hwang, J. (2020). The effects of target location on musculoskeletal load, task performance, and subjective discomfort during virtual reality interactions. *Applied Ergonomics*, 84, 103010. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.103010>
- Persuh, M., LaRock, E., & Berger, J. (2018). Working Memory and Consciousness: The Current State of Play. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00078>
- Peterson, S. M., Furuichi, E., & Ferris, D. P. (2018). Effects of virtual reality high heights exposure during beam-walking on physiological stress and cognitive loading. *PLoS One*, 13(7), e0200306. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200306>
- Pfeuffer, K., Geiger, M. J., Prange, S., Mecke, L., Buschek, D., & Alt, F. (2019). Behavioural Biometrics in VR: Identifying People from Body Motion and Relations in Virtual Reality. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–12. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300340>
- Pia, L., Garbarini, F., Kalckert, A., & Wong, H. Y. (2019). *Owning a Body + Moving a Body = Me?* Frontiers Media SA.
- Picard-Deland, C., Pastor, M., Solomonova, E., Paquette, T., & Nielsen, T. (2020). Flying dreams stimulated by an immersive virtual reality task. *Consciousness and Cognition*, 83, 102958. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2020.102958>
- Pillai, J. S., Schmidt, C., & Richir, S. (2013). Achieving Presence through Evoked Reality. *Frontiers in Psychology*, 4, 86. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00086>

- Pithers, R. (2002). Cognitive learning style: A review of the field dependent-field independent approach. *Journal of Vocational Education & Training*, 54(1), 117–132. <https://doi.org/10.1080/13636820200200191>
- Pitt, D. (2020). Mental Representation. In E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2020). Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2020/entries/mental-representation/>
- Pitts, M. A., Lutsyshyna, L. A., & Hillyard, S. A. (2018). The relationship between attention and consciousness: An expanded taxonomy and implications for ‘no-report’ paradigms. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1755), 20170348. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0348>
- Plancher, G., Barra, J., Orriols, E., & Piolino, P. (2013). The influence of action on episodic memory: A virtual reality study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 66(5), 895–909. <https://doi.org/10.1080/17470218.2012.722657>
- Plancher, G., Gyselinck, V., Nicolas, S., & Piolino, P. (2010). Age effect on components of episodic memory and feature binding: A virtual reality study. *Neuropsychology*, 24(3), 379–390. <https://doi.org/10.1037/a0018680>
- Plancher, G., Gyselinck, V., & Piolino, P. (2018). The Integration of Realistic Episodic Memories Relies on Different Working Memory Processes: Evidence from Virtual Navigation. *Frontiers in Psychology*, 9, 47. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00047>
- Plancher, G., Nicolas, S., & Piolino, P. (2008). Virtual reality as a tool for assessing episodic memory. *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 179–182. <https://doi.org/10.1145/1450579.1450617>
- Plancher, G., Tirard, A., Gyselinck, V., Nicolas, S., & Piolino, P. (2012). Using virtual reality to characterize episodic memory profiles in amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer’s disease: Influence of active and passive encoding. *Neuropsychologia*, 50(5), 592–602. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.12.013>
- Platon. (2002). *La République* (Nouvelle). Flammarion.
- Plaze, M., Paillère-Martinot, M.-L., Penttilä, J., Januel, D., de Beaurepaire, R., Bellivier, F., Andoh, J., Galinowski, A., Gallarda, T., Artiges, E., Olié, J.-P., Mangin, J.-F., Martinot, J.-L., & Cachia, A. (2011). “Where Do Auditory Hallucinations Come From?”—A Brain Morphometry Study of Schizophrenia Patients With Inner or Outer Space Hallucinations. *Schizophrenia Bulletin*, 37(1), 212–221. <https://doi.org/10.1093/schbul/sbp081>
- Pollard, K. A., Oiknine, A. H., Files, B. T., Sinatra, A. M., Patton, D., Ericson, M., Thomas, J., & Khooshabeh, P. (2020). Level of immersion affects spatial learning in virtual environments:

- Results of a three-condition within-subjects study with long intersession intervals. *Virtual Reality*. <https://doi.org/10.1007/s10055-019-00411-y>
- Portman, M. E., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2015). To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, *54*, 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.05.001>
- Posner, M. I. (1994). Attention: The mechanisms of consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *91*(16), 7398–7403.
- Pourmand, A., Davis, S., Marchak, A., Whiteside, T., & Sikka, N. (2018). Virtual Reality as a Clinical Tool for Pain Management. *Current Pain and Headache Reports*, *22*(8), 53. <https://doi.org/10.1007/s11916-018-0708-2>
- Price, M., & Anderson, P. (2007). The role of presence in virtual reality exposure therapy. *Journal of Anxiety Disorders*, *21*(5), 742–751. <https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2006.11.002>
- Pritchard, S. C., Zopf, R., Polito, V., Kaplan, D. M., & Williams, M. A. (2016). Non-hierarchical Influence of Visual Form, Touch, and Position Cues on Embodiment, Agency, and Presence in Virtual Reality. *Frontiers in Psychology*, *7*, 1649. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01649>
- Profet, M. (1992). Pregnancy sickness as adaptation: A deterrent to maternal ingestion of teratogens. In *The Adapted Mind: Evolutionary Psychology and the Generation of Culture* (pp. 327–365). Barkow J. H, Cosmides L., Tooby J.
- Prothero, J. D., Draper, M. H., Furness, T. A., Parker, D. E., & Wells, M. J. (1999). The use of an independent visual background to reduce simulator side-effects. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *70*(3 Pt 1), 277–283.
- Prothero, J. D., & Hoffman, H. G. (1995). Widening the field of view increases the sense of presence in immersive virtual environments. In *Technical Report TR-95-2, Human Interface Technology Lab*.
- Purschke, F., Rabätje, R., Schulze, M., Starke, A., Symietz, M., & Zimmermann, P. (1998). Virtual Reality (VR)—New Methods for Improving and Accelerating Vehicle Development. In F. Dai (Ed.), *Virtual Reality for Industrial Applications* (pp. 105–122). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46847-6_7
- Rabbitt, P. (2015). Broadbent, Donald Eric (1926–93). In J. D. Wright (Ed.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition)* (pp. 856–858). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.61015-2>

- Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, *147*, 103778. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>
- Rauschenberger, R., & Barakat, B. (2020). Health and Safety of VR Use by Children in an Educational Use Case. *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 878–884. <https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.00010>
- Ravaja, N., Saari, T., Turpeinen, M., Laarni, J., Salminen, M., & Kivikangas, M. (2006). Spatial Presence and Emotions during Video Game Playing: Does It Matter with Whom You Play? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *15*(4), 381–392. <https://doi.org/10.1162/pres.15.4.381>
- Réalité virtuelle. (2020). In *Wikipedia*. https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9alit%C3%A9_virtuelle
- Reality–virtuality continuum. (2020). In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Reality%E2%80%93virtuality_continuum&oldid=948240836
- Reason, J., & Brand, J. J. (1975). *Motion Sickness*. Academic Press Inc.
- Rebenitsch, L., & Owen, C. (2016a). Review on Cybersickness in Applications and Visual Displays. *Virtual Real.*, *20*(2), 101–125. <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0285-9>
- Rebenitsch, L., & Owen, C. (2016b). Review on cybersickness in applications and visual displays. *Virtual Reality*, *20*(2), 101–125. <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0285-9>
- Rehbein, F., Staudt, A., Hanslmaier, M., & Kliem, S. (2016). Video game playing in the general adult population of Germany: Can higher gaming time of males be explained by gender specific genre preferences? *Computers in Human Behavior*, *55*, 729–735. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.10.016>
- Reilly, P. (1990). *Towards a virtual archaeology* [Conference]. CAA 90. <https://eprints.soton.ac.uk/353058/>
- Renaud, P., Décarie, J., Gourd, S.-P., Paquin, L.-C., & Bouchard, S. (2003). Eye-tracking in immersive environments: A general methodology to analyze affordance-based interactions from oculomotor dynamics. *Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, *6*(5), 519–526. <https://doi.org/10.1089/109493103769710541>
- Renaud, P., Goyette, M., Chartier, S., Zhornitski, S., Trottier, D., Rouleau, J.-L., Proulx, J., Fedoroff, P., Bradford, J.-P., Dassylva, B., & Bouchard, S. (2010). Sexual affordances, perceptual-motor invariance extraction and intentional nonlinear dynamics: Sexually deviant and

- non-deviant patterns in male subjects. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 14(4), 463–489.
- Renaud, P., Joyal, C., Stoleru, S., Goyette, M., Weiskopf, N., & Birbaumer, N. (2011). Real-time functional magnetic imaging-brain-computer interface and virtual reality promising tools for the treatment of pedophilia. *Progress in Brain Research*, 192, 263–272. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53355-5.00014-2>
- Renaud, P., Rouleau, J. L., Granger, L., Barsetti, I., & Bouchard, S. (2002). Measuring Sexual Preferences in Virtual Reality: A Pilot Study. *CyberPsychology & Behavior*, 5(1), 1–9. <https://doi.org/10.1089/109493102753685836>
- Renaud, P., Trottier, D., Nolet, K., Rouleau, J. L., Goyette, M., & Bouchard, S. (2013). Sexual Self-Regulation and Cognitive Absorption as Factors of Sexual Response Toward Virtual Characters. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 17(4), 241–247. <https://doi.org/10.1089/cyber.2013.0165>
- Rescorla, M. (2020). The Computational Theory of Mind. In E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2020). Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2020/entries/computational-mind/>
- Revelle, W., & Loftus, D. A. (1992). The implications of arousal effects for the study of affect and memory. *The Handbook of Emotion and Memory: Research and Theory*, 113–149.
- Revonsuo, A. (1995). Consciousness, dreams and virtual realities. *Philosophical Psychology*, 8(1), 35–58. <https://doi.org/10.1080/09515089508573144>
- Revonsuo, A. (2006). *Inner presence: Consciousness as a biological phenomenon* (pp. xxv, 473). MIT Press.
- Rey, B., Alcaniz, M., Tembl, J., & Parkhutik, V. (2010). Brain activity and presence: A preliminary study in different immersive conditions using transcranial Doppler monitoring. *Virtual Reality*, 14(1), 55–65. <https://doi.org/10.1007/s10055-009-0141-2>
- Rey, B., Parkhutik, V., Tembl, J., & Alcaniz, M. (2011). Breaks in Presence in Virtual Environments: An Analysis of Blood Flow Velocity Responses. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 20(3), 273–286.
- Richardson, A. E., Powers, M. E., & Bousquet, L. G. (2011). Video game experience predicts virtual, but not real navigation performance. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 552–560. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.10.003>

- Riches, S., Elghany, S., Garety, P., Rus-Calafell, M., & Valmaggia, L. (2019). Factors Affecting Sense of Presence in a Virtual Reality Social Environment: A Qualitative Study. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 22(4), 288–292. <https://doi.org/10.1089/cyber.2018.0128>
- Riley, J. M., Kaber, D. B., & Draper, J. V. (2004). Situation awareness and attention allocation measures for quantifying telepresence experiences in teleoperation. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 14(1), 51–67. <https://doi.org/10.1002/hfm.10050>
- Riva, G., Davide, F., Ijsselstein, W. A., Waterworth, E. L., & Waterworth, J. A. (2003). *Being There: Concepts, effects and measurement of user presence in [35] synthetic environments*.
- Riva, Giuseppe. (2006). Being-in-the-World-With: Presence Meets Social and Cognitive Neuroscience. In Riva, Prof. G. (2006) *Being-in-the-World-With: Presence Meets Social and Cognitive Neuroscience*. [Book Chapter].
- Riva, Giuseppe, Mantovani, F., Capideville, C. S., Preziosa, A., Morganti, F., Villani, D., Gaggioli, A., Botella, C., & Alcañiz, M. (2007). Affective interactions using virtual reality: The link between presence and emotions. *Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, 10(1), 45–56. <https://doi.org/10.1089/cpb.2006.9993>
- Riva, Giuseppe, & Waterworth, J. A. (2003). Presence and the Self: A cognitive neuroscience approach. *Presence-Connect*, 3(3).
- Riva, Giuseppe, Wiederhold, B. K., & Mantovani, F. (2019). Neuroscience of Virtual Reality: From Virtual Exposure to Embodied Medicine. *Cyberpsychology, Behavior and Social Networking*, 22(1), 82–96. <https://doi.org/10.1089/cyber.2017.29099.gri>
- Robillard, G., Bouchard, S., Renaud, P., & Cournoyer, L.-G. (2002). *Validation canadienne-française de deux mesures importantes en réalité virtuelle: L'Immersive Tendancies Questionnaire et le Presence Questionnaire*. Poster presented at the 25ième congrès de la Société Québécoise pour la Recherche en Psychologie (SQRP).
- Rolnick, A., & Lubow, R. E. (1991). Why is the driver rarely motion sick? The role of controllability in motion sickness. *Ergonomics*, 34(7), 867–879. <https://doi.org/10.1080/00140139108964831>
- Rosa, P. J., Morais, D., Gamito, P., Oliveira, J., & Saraiva, T. (2016). The Immersive Virtual Reality Experience: A Typology of Users Revealed Through Multiple Correspondence Analysis

- Combined with Cluster Analysis Technique. *Cyberpsychology, Behavior and Social Networking*, 19(3), 209–216. <https://doi.org/10.1089/cyber.2015.0130>
- Ross, R. M. (2005). *The D2 Test of Attention: An Examination of Age, Gender, and Cross-cultural Indices*. Argosy University.
- Roswell, R. O., Cogburn, C. D., Tocco, J., Martinez, J., Bangeranye, C., Bailenson, J., Wright, M., Mieres, J. H., & Smith, L. (2020). Cultivating Empathy Through Virtual Reality: Advancing Conversations About Racism, Inequity, and Climate in Medicine. *Academic Medicine: Journal of the Association of American Medical Colleges*. <https://doi.org/10.1097/ACM.0000000000003615>
- Rousseaux, F., Bicego, A., Ledoux, D., Massion, P., Nyssen, A.-S., Faymonville, M.-E., Laureys, S., & Vanhauzenhuysse, A. (2020). Hypnosis Associated with 3D Immersive Virtual Reality Technology in the Management of Pain: A Review of the Literature. *Journal of Pain Research*, 13, 1129–1138. <https://doi.org/10.2147/JPR.S231737>
- Roussos, A. J., Braun, M., & Asiain, J. (2018). [Virtual reality in mental health]. *Vertex (Buenos Aires, Argentina)*, 29(137), 41–50.
- Rowlands, M. (2010). Chapter 3: The mind embedded. In *The new science of the mind: From extended mind to embodied phenomenology* (p. 70). MIT Press.
- Rus-Calafell, M., Garety, P., Sason, E., Craig, T. J. K., & Valmaggia, L. R. (2018). Virtual reality in the assessment and treatment of psychosis: A systematic review of its utility, acceptability and effectiveness. *Psychological Medicine*, 48(3), 362–391. <https://doi.org/10.1017/S0033291717001945>
- Rus-Calafell, M., Gutierrez-Maldonado, J., & Ribas-Sabate, J. (2013). Neurocognition, Presence and Acceptance Of a VR Programme For Psychotic Patients: A Correlational Study. In B. K. Wiederhold & G. Riva (Eds.), *Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine 2013: Positive Technology and Health Engagement for Healthy Living and Active Ageing* (Vol. 191, pp. 141–145). Ios Press.
- Ruspoli, M. (2003). *Lascaux un nouveau regard*. Bordas Editions.
- Russo, T., & Benson, S. (2005). Learning with Invisible Others: Perceptions of Online Presence and their Relationship to Cognitive and Affective Learning. *Journal of Educational Technology & Society*, 8(1), 54–62. JSTOR.
- Ryan, M.-L. (1999). Immersion vs. Interactivity: Virtual Reality and Literary Theory. *SubStance*, 28(2), 110–137. <https://doi.org/10.1353/sub.1999.0015>
- Ryan, M.-L. (2015). *Narrative as Virtual Reality 2: Revisiting Immersion and Interactivity in Literature and Electronic Media*. JHU Press.

- Sadowski, W., & Stanney, K. (2002). Presence in virtual environments. In *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications* (pp. 791–806). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Salehi, E., Mehrabi, M., Fatehi, F., & Salehi, A. (2020). Virtual Reality Therapy for Social Phobia: A Scoping Review. *Studies in Health Technology and Informatics*, 270, 713–717. <https://doi.org/10.3233/SHTI200253>
- Samani, A., Pontonnier, C., Dumont, G., & Madeleine, P. (2015). Shoulder Kinematics and Spatial Pattern of Trapezius Electromyographic Activity in Real and Virtual Environments. *PLoS ONE*, 10(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116211>
- Sanchez-Vives, M. V., & Slater, M. (2005). From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(4), 332–339. <https://doi.org/10.1038/nrn1651>
- Saputra, R., Iqbal, B. M., & Komarudin. (2017). Stress Emotion Evaluation in Multiplayer Online Battle Arena (MOBA) Video Game Related to Gaming Rules Using Electroencephalogram (EEG). *Proceedings of the 2017 4th International Conference on Biomedical and Bioinformatics Engineering*, 74–77. <https://doi.org/10.1145/3168776.3168797>
- Saucier, D. M., Green, S. M., Leason, J., MacFadden, A., Bell, S., & Elias, L. J. (2002). Are sex differences in navigation caused by sexually dimorphic strategies or by differences in the ability to use the strategies? *Behavioral Neuroscience*, 116(3), 403–410. <https://doi.org/10.1037//0735-7044.116.3.403>
- Scarpina, F., & Tagini, S. (2017). The Stroop Color and Word Test. *Frontiers in Psychology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00557>
- Schacter, D. L., & Addis, D. R. (2007). The cognitive neuroscience of constructive memory: Remembering the past and imagining the future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1481), 773–786. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2087>
- Schroeder, R. (2002). Copresence and interaction in virtual environments: An overview of the range of issues. *Presence 2002: Fifth International Workshop*, 274–295.
- Schubert, T., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. (2001). The Experience of Presence: Factor Analytic Insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 266–281. <https://doi.org/10.1162/105474601300343603>
- Schuemie, M. J., van der Straaten, P., Krijn, M., & van der Mast, C. A. (2001). Research on presence in virtual reality: A survey. *Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, 4(2), 183–201. <https://doi.org/10.1089/109493101300117884>

- Schwartz, M. S., & Andrasik, F. (2017). *Biofeedback, Fourth Edition: A Practitioner's Guide*. Guilford Publications.
- Schwartz, V. R., & Przyblyski, J. M. (2004). *The Nineteenth-century Visual Culture Reader*. Psychology Press.
- Schwind, V., Knierim, P., Haas, N., & Henze, N. (2019). Using Presence Questionnaires in Virtual Reality. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–12. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300590>
- Scotto Di Cesare, C., Macaluso, T., Mestre, D. R., & Bringoux, L. (2015). Slow changing postural cues cancel visual field dependence on self-tilt detection. *Gait & Posture*, *41*(1), 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.09.027>
- Scozzari, S., & Gamberini, L. (2011). Virtual Reality as a Tool for Cognitive Behavioral Therapy: A Review. In S. Brahmam & L. C. Jain (Eds.), *Advanced Computational Intelligence Paradigms in Healthcare 6. Virtual Reality in Psychotherapy, Rehabilitation, and Assessment* (pp. 63–108). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17824-5_5
- Serafin, S., Erkut, C., Kojs, J., Nilsson, N. C., & Nordahl, R. (2016). Virtual Reality Musical Instruments: State of the Art, Design Principles, and Future Directions. *Computer Music Journal*, *40*(3), 22–40. https://doi.org/10.1162/COMJ_a_00372
- Seraglia, B., Gamberini, L., Priftis, K., Scatturin, P., Martinelli, M., & Cutini, S. (2011). An exploratory fNIRS study with immersive virtual reality: A new method for technical implementation. *Frontiers in Human Neuroscience*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00176>
- Seth, A. K., Suzuki, K., & Critchley, H. D. (2011). An interoceptive predictive coding model of conscious presence. *Frontiers in Psychology*, *2*, 395. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00395>
- Shafer, D.-M., Carbonara, C.-P., & Kropi, M.-F. (2017). Modern Virtual Reality Technology: Cybersickness, Sense of Presence, and Gender. *Media Psychology Review*, *11*(2).
- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, *27*, 379–423.
- Sheridan, T. B. (1992). Musings on Telepresence and Virtual Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *1*(1), 120–126. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.120>
- Sheridan, T. B. (1999). Descartes, Heidegger, Gibson, and God: Toward an Eclectic Ontology of Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *8*(5), 551–559. <https://doi.org/10.1162/105474699566468>
- Shneiderman, B. (1997). *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction* (3rd ed.). Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.

- Short, J., Williams, E., & Christie, B. (1976). *The social psychology of telecommunications*. Wiley.
- Sieroff, É. (2008). L'attention. In *Traité de neuropsychologie clinique* (pp. 263–293). De Boeck Supérieur. <https://www.cairn.info/traite-de-neuropsychologie-clinique--9782804156787-page-263.htm>
- Silva, M. P., Silva, V. do N., & Chaimowicz, L. (2017). Dynamic difficulty adjustment on MOBA games. *Entertainment Computing*, 18, 103–123. <https://doi.org/10.1016/j.ent-com.2016.10.002>
- Silverman, I., & Eals, M. (1992). Sex differences in spatial abilities: Evolutionary theory and data. In *The adapted mind: Evolutionary psychology and the generation of culture* (pp. 533–549). Oxford University Press.
- Singh, Y., Prado, A., Martelli, D., Petros, F. E., Ai, X., Mukherjee, S., Lalwani, A. K., Vashista, V., & Agrawal, S. K. (2020). Dual-Motor-Task of Catching and Throwing a Ball During Over-ground Walking in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering: A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 28(7), 1661–1667. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.2999352>
- Sirkkunen, E., Vääätäjä, H., Uskali, T., & Rezaei, P. P. (2016). Journalism in virtual reality: Opportunities and future research challenges. *Proceedings of the 20th International Academic Mindtrek Conference*, 297–303. <https://doi.org/10.1145/2994310.2994353>
- Skinner, B. F. (1948). "Superstition" in the Pigeon. *Journal of Experimental Psychology*, 38(2), 168. <https://doi.org/10.1037/h0055873>
- Slater, M. (2004). How Colorful Was Your Day? Why Questionnaires Cannot Assess Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(4), 484–493. <https://doi.org/10.1162/1054746041944849>
- Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1535), 3549–3557. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138>
- Slater, M. (2018). Immersion and the illusion of presence in virtual reality. *British Journal of Psychology*, 109(3), 431–433. <https://doi.org/10.1111/bjop.12305>
- Slater, M., Antley, A., Davison, A., Swapp, D., Guger, C., Barker, C., Pistrang, N., & Sanchez-Vives, M. V. (2006). A Virtual Reprise of the Stanley Milgram Obedience Experiments. *PLoS ONE*, 1(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000039>
- Slater, M., Brogni, A., & Steed, A. (2003). *Physiological Responses to Breaks in Presence: A Pilot Study*. 157.

- Slater, M., Gonzalez-Liencre, C., Haggard, P., Vinkers, C., Gregory-Clarke, R., Jelley, S., Watson, Z., Breen, G., Schwarz, R., Steptoe, W., Szostak, D., Halan, S., Fox, D., & Silver, J. (2020). The Ethics of Realism in Virtual and Augmented Reality. *Frontiers in Virtual Reality*, 1. <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.00001>
- Slater, M., Linakis, V., Usoh, M., & Kooper, R. (1996). Immersion, Presence and Performance in Virtual Environments: An Experiment with Tri-dimensional Chess. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 163–172. <https://doi.org/10.1145/3304181.3304216>
- Slater, M., Sadagic, A., Usoh, M., & Schroeder, R. (2000). Small-Group Behavior in a Virtual and Real Environment: A Comparative Study. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(1), 37–51. <https://doi.org/10.1162/105474600566600>
- Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing Our Lives with Immersive Virtual Reality. *Frontiers in Robotics and Ai*, 3, 74. <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00074>
- Slater, M., Spanlang, B., & Corominas, D. (2010). Simulating virtual environments within virtual environments as the basis for a psychophysics of presence. *ACM SIGGRAPH 2010 Papers*, 1–9. <https://doi.org/10.1145/1833349.1778829>
- Slater, M., Spanlang, B., Sanchez-Vives, M. V., & Blanke, O. (2010). First Person Experience of Body Transfer in Virtual Reality. *PLOS ONE*, 5(5), e10564. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010564>
- Slater, M., & Steed, A. (2000). A Virtual Presence Counter. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5), 413–434. <https://doi.org/10.1162/105474600566925>
- Slater, M., Steed, A., McCarthy, J., & Maringelli, F. (1998). The influence of body movement on subjective presence in virtual environments. *Human Factors*, 40(3), 469–477. <https://doi.org/10.1518/001872098779591368>
- Slater, M., Usoh, M., & Chrysanthou, Y. (1995). The Influence of Dynamic Shadows on Presence in Immersive Virtual Environments. In M. Göbel (Ed.), *Virtual Environments '95* (pp. 8–21). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-9433-1_2
- Slater, M., Usoh, M., & Steed, A. (1994). Depth of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2), 130–144. <https://doi.org/10.1162/pres.1994.3.2.130>
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6), 603–616. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>

- Sloot, L. H., Harlaar, J., & van der Krogt, M. M. (2015). Self-paced versus fixed speed walking and the effect of virtual reality in children with cerebral palsy. *Gait & Posture*, *42*(4), 498–504. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.08.003>
- Sloot, L. H., van der Krogt, M. M., & Harlaar, J. (2014). Effects of adding a virtual reality environment to different modes of treadmill walking. *Gait & Posture*, *39*(3), 939–945. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.12.005>
- Smith, S. M., & Vela, E. (2001). Environmental context-dependent memory: A review and meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, *8*(2), 203–220. <https://doi.org/10.3758/bf03196157>
- Smolentsev, A., Cornick, J. E., & Blascovich, J. (2017). Using a preamble to increase presence in digital virtual environments. *Virtual Reality*, *21*(3), 153–164. <https://doi.org/10.1007/s10055-017-0305-4>
- Sonnentag, S. (2003). *Psychological Management of Individual Performance*. John Wiley & Sons.
- Sousa Santos, B., Dias, P., Pimentel, A., Baggerman, J.-W., Ferreira, C., Silva, S., & Madeira, J. (2008). Head-mounted display versus desktop for 3D navigation in virtual reality: A user study. *Multimedia Tools and Applications*, *41*(1), 161. <https://doi.org/10.1007/s11042-008-0223-2>
- Spencer, S. J., Steele, C. M., & Quinn, D. M. (1999). Stereotype Threat and Women's Math Performance. *Journal of Experimental Social Psychology*, *35*(1), 4–28. <https://doi.org/10.1006/jesp.1998.1373>
- Staley, D. J. (2002). Computers, Visualization, and History: How New Technology Will Transform Our Understanding of the Past. *History: Reviews of New Books*, *31*(3), 129–129. <https://doi.org/10.1080/03612759.2003.10527621>
- Stanney, K. M., Fidopiastis, C., & Foster, L. (2020). Virtual Reality Is Sexist: But It Does Not Have to Be. *Frontiers in Robotics and AI*, *7*. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00004>
- Stanney, K. M., Hale, K. S., Nahmens, I., & Kennedy, R. S. (2003). What to expect from immersive virtual environment exposure: Influences of gender, body mass index, and past experience. *Human Factors*, *45*(3), 504–520. <https://doi.org/10.1518/hfes.45.3.504.27254>
- Stanney, K. M., Kennedy, R. S., & Drexler, J. M. (1997). Cybersickness is Not Simulator Sickness. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *41*(2), 1138–1142. <https://doi.org/10.1177/107118139704100292>
- Stanney, K. M., Mourant, R. R., & Kennedy, R. S. (1998). Human Factors Issues in Virtual Environments: A Review of the Literature. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *7*(4), 327–351. <https://doi.org/10.1162/105474698565767>

- Starcke, K., Wiesen, C., Trotzke, P., & Brand, M. (2016). Effects of Acute Laboratory Stress on Executive Functions. *Frontiers in Psychology, 7*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00461>
- Steuer, J. (1992). Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. *Journal of Communication, 42*(4), 73–93. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x>
- Steve. (2017, January 15). Why are Mobas so Toxic? *Steve's Game Design Blog*. <https://stevesgamedesignblog.wordpress.com/2017/01/15/why-are-mobas-so-toxic/>
- Stevens, B., & Jerrams-Smith, J. (2000). The Sense of Object-Presence with Projection-Augmented Models. *Proceedings of the First International Workshop on Haptic Human-Computer Interaction, 194–198*.
- Stevens, B., Jerrams-Smith, J., Heathcote, D., & Callear, D. (2002). Putting the virtual into reality: Assessing object-presence with projection-augmented models. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 11*(1), 79–92. <https://doi.org/10.1162/105474602317343677>
- Stevens, J. A., & Kincaid, J. P. (2015). The Relationship between Presence and Performance in Virtual Simulation Training. *Open Journal of Modelling and Simulation, 03*(02), 41–48. <https://doi.org/10.4236/ojmsi.2015.32005>
- Stoffregen, T. A., & Smart, L. J. (1998). Postural instability precedes motion sickness. *Brain Research Bulletin, 47*(5), 437–448. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00102-6)
- Stokes, D., Matthen, M., & Biggs, S. (2014). *The Dominance of the Visual*. Oxford University Press.
- Stowers, J. R., Hofbauer, M., Bastien, R., Griessner, J., Higgins, P., Farooqui, S., Fischer, R. M., Nowikovskiy, K., Haubensak, W., Couzin, I. D., Tessmar-Raible, K., & Straw, A. D. (2017). Virtual Reality for Freely Moving Animals. *Nature Methods, 14*(10), 995–1002. <https://doi.org/10.1038/nmeth.4399>
- Strickland, D., & Chartier, D. (1997). EEG Measurements in a Virtual Reality Headset. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6*(5), 581–589. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.5.581>
- Sugiura, K., Iino, S., & Tsuchiya, T. (2016). Development of a high presence virtual reality system by binaural sound field rendering with head mount display. *The Journal of the Acoustical Society of America, 140*(4), 3249–3249. <https://doi.org/10.1121/1.4970278>
- Suh, A., & Prophet, J. (2018). The state of immersive technology research: A literature analysis. *Computers in Human Behavior, 86*, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.04.019>
- Sullivan, J. V. (2018). Learning and Embodied Cognition: A Review and Proposal. *Psychology Learning & Teaching, 17*(2), 128–143. <https://doi.org/10.1177/1475725717752550>

- Sustainable Development Goals*. (2020). UNDP. <https://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals.html>
- Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*, 757–764. <https://doi.org/10.1145/1476589.1476686>
- Sutherland, I. E. (1965). The Ultimate Display. *Proceedings of the IFIP Congress*, 506–508.
- Sutton, K. (2019). *Can Porn Save VR?* <https://www.adweek.com/digital/can-porn-save-vr/>
- Swindells, C., Po, B. A., Hajshirmohammadi, I., Corrie, B., Dill, J. C., Fisher, B. D., & Booth, K. S. (2004). Comparing CAVE, wall, and desktop displays for navigation and wayfinding in complex 3D models. *Proceedings Computer Graphics International, 2004.*, 420–427. <https://doi.org/10.1109/CGI.2004.1309243>
- Synofzik, M., Thier, P., Leube, D. T., Schlotterbeck, P., & Lindner, A. (2010). Misattributions of agency in schizophrenia are based on imprecise predictions about the sensory consequences of one's actions. *Brain: A Journal of Neurology*, 133(Pt 1), 262–271. <https://doi.org/10.1093/brain/awp291>
- Szpak, A., Michalski, S. C., Saredakis, D., Chen, C. S., & Loetscher, T. (2019). Beyond Feeling Sick: The Visual and Cognitive Aftereffects of Virtual Reality. *IEEE Access*, 7, 130883–130892. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940073>
- Szymczyk, T., Montusiewicz, J., & Kesik, J. (2016). Interactive 3d Environment for Conducting Demonstrations and Training in the Reconstruction of Archaeological Objects. In L. G. Chova, A. L. Martinez, & I. C. Torres (Eds.), *Edulearn16: 8th International Conference on Education and New Learning Technologies* (pp. 1278–1287). IATED-Int Assoc Technology Education a& Development.
- Tamas, B., Bela, B., & Kerekes, Z. (2010). The Presence of Others, Prosocial Traits, Machiavellianism. *Social Psychology*, 41(4), 238–245. <https://doi.org/10.1027/1864-9335/a000032>
- Tamborini, R., & Skalski, P. (2006). The Role of Presence in the Experience of Electronic Games. In *Playing video games: Motives, responses, and consequences* (pp. 225–240). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Tardif, N., Therrien, C.-É., & Bouchard, S. (2019). Re-Examining Psychological Mechanisms Underlying Virtual Reality-Based Exposure for Spider Phobia. *Cyberpsychology, Behavior and Social Networking*, 22(1), 39–45. <https://doi.org/10.1089/cyber.2017.0711>
- Tarnanas, I., Schlee, W., Tsolaki, M., Müri, R., Mosimann, U., & Nef, T. (2013). Ecological validity of virtual reality daily living activities screening for early dementia: Longitudinal study. *JMIR Serious Games*, 1(1), e1. <https://doi.org/10.2196/games.2778>

- Tascon, L., Boccia, M., Piccardi, L., & Cimadevilla, J. M. (2017). Differences in Spatial Memory Recognition Due to Cognitive Style. *Frontiers in Pharmacology*, 8, 550. <https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00550>
- Terrenoire, E., Hauglustaine, D. A., Gasser, T., & Penanhoat, O. (2019). The contribution of carbon dioxide emissions from the aviation sector to future climate change. *Environmental Research Letters*, 14(8), 084019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3086>
- The Wachowskis. (1999). *The Matrix*. Warner Bros.
- Thompson, E. (2007). *Mind in Life*. Harvard University Press.
- Tieri, G., Morone, G., Paolucci, S., & Iosa, M. (2018). Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: Facts, fiction and fallacies. *Expert Review of Medical Devices*, 15(2), 107–117. <https://doi.org/10.1080/17434440.2018.1425613>
- Tinajero, C., & Páramo, M. F. (1998). Field dependence-independence cognitive style and academic achievement: A review of research and theory. *European Journal of Psychology of Education*, 13(2), 227–251. JSTOR.
- Toet, A., Vries, S. C. de, Emmerik, M. L. van, & Bos, J. E. (2008). Cybersickness and desktop simulations: Field of view effects and user experience. *Enhanced and Synthetic Vision 2008*, 6957, 69570P. <https://doi.org/10.1117/12.771992>
- Tolich, M. (2014). What can Milgram and Zimbardo teach ethics committees and qualitative researchers about minimizing harm? *Research Ethics*, 10(2), 86–96. <https://doi.org/10.1177/1747016114523771>
- Tosi, G., Parmar, J., Dhillon, I., Maravita, A., & Iaria, G. (2020). Body illusion and affordances: The influence of body representation on a walking imagery task in virtual reality. *Experimental Brain Research*. <https://doi.org/10.1007/s00221-020-05874-z>
- Treisman, M. (1977). Motion sickness: An evolutionary hypothesis. *Science (New York, N.Y.)*, 197(4302), 493–495.
- Trumbull, D. (1983). *Brainstorm*. MGM/UA Entertainment Company.
- Tulving, E. (1985). Memory and Consciousness. *Canadian Psychology*, 26, 1–12.
- Turing, A. M. (2009). Computing Machinery and Intelligence. In R. Epstein, G. Roberts, & G. Beber (Eds.), *Parsing the Turing Test: Philosophical and Methodological Issues in the Quest for the Thinking Computer* (Original work published 1950, pp. 23–65). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6710-5_3
- Turner, T. L., & Hellbaum, R. F. (1986). *LC shutter glasses provide 3-D display for simulated flight*. Society for Information Display.

- Uhm, J.-P., Lee, H.-W., & Han, J.-W. (2020). Creating sense of presence in a virtual reality experience: Impact on neurophysiological arousal and attitude towards a winter sport. *Sport Management Review*, 23(4), 588–600. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2019.10.003>
- Usher, W., Klacansky, P., Federer, F., Bremer, P.-T., Knoll, A., Angelucci, A., & Pascucci, V. (2017). A Virtual Reality Visualization Tool for Neuron Tracing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2744079>
- Usoh, M., Catena, E., Arman, S., & Slater, M. (2000). Using Presence Questionnaires in Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5), 497–503. <https://doi.org/10.1162/105474600566989>
- Van Boxtel, J. J. A., Tsuchiya, N., & Koch, C. (2010). Consciousness and Attention: On Sufficiency and Necessity. *Frontiers in Psychology*, 1. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2010.00217>
- Varela, F. J., Rosch, E., & Thompson, E. (1992). *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. MIT Press.
- Västfjäll, D. (2003). The subjective sense of presence, emotion recognition, and experienced emotions in auditory virtual environments. *Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, 6(2), 181–188. <https://doi.org/10.1089/109493103321640374>
- Verdú, S. (2000). Fifty years of Shannon theory. In *Information theory: 50 years of discovery* (pp. 13–34). IEEE Press.
- Vergara, I. (2020, April 20). *Contraint par le coronavirus, Laval Virtual lance un salon à 100% en réalité virtuelle*. Le Figaro.fr. <https://www.lefigaro.fr/secteur/high-tech/contraint-par-le-coronavirus-laval-virtual-lance-un-salon-a-100-en-realite-virtuelle-20200420>
- Verhulst, E., Banville, F., Richard, P., Tabet, S., Lussier, C., Massicotte, É., & Allain, P. (2017). Navigation Patterns in Ederly During Multitasking in Virtual Environment. In S. Yamamoto (Ed.), *Human Interface and the Management of Information: Supporting Learning, Decision-Making and Collaboration* (pp. 176–188). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58524-6_16
- Verwulgen, S., Van Goethem, S., Cornelis, G., Verlinden, J., & Coppens, T. (2020). Appreciation of Proportion in Architecture: A Comparison Between Facades Primed in Virtual Reality and on Paper. In T. Ahram (Ed.), *Advances in Human Factors in Wearable Technologies and Game Design* (Vol. 973, pp. 305–314). Springer International Publishing Ag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20476-1_31
- Video games as an art form. (2020). In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Video_games_as_an_art_form&oldid=946552400

- Vienne, C., Masfrand, S., Bourdin, C., & Vercher, J.-L. (2020). Depth Perception in Virtual Reality Systems: Effect of Screen Distance, Environment Richness and Display Factors. *IEEE Access*, 8, 29099–29110. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972122>
- Virtual Reality. (2020a). In *Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus*. Cambridge University Press.
- Virtual reality. (2020b). In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_reality
- Virtual Reality 101: What You Need to Know About Kids and VR | Common Sense Media*. (2020). <https://www.commonsensemedia.org/research/virtual-reality-101>
- Vlaeyen, J. W. S., & Crombez, G. (2009). La psychologie de la peur et de la douleur. *Revue du Rhumatisme*, 76(6), 511–516. <https://doi.org/10.1016/j.rhum.2009.03.004>
- Vurpillot, D. (2016). *Aspectus operis and visual attention: From Vitruvius to Virtual Reality*. <https://hal-bnf.archives-ouvertes.fr/hal-01302286>
- Wallach, H. S., Safir, M. P., Samana, R., Almog, I., & Horef, R. (2011). How Can Presence in Psychotherapy Employing VR Be Increased? Chapter for Inclusion in: Systems in Health Care Using Agents and Virtual Reality. In S. Brahnem & L. C. Jain (Eds.), *Advanced Computational Intelligence Paradigms in Healthcare 6. Virtual Reality in Psychotherapy, Rehabilitation, and Assessment* (pp. 129–147). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17824-5_7
- Waller, D., Hunt, E., & Knapp, D. (1998). The Transfer of Spatial Knowledge in Virtual Environment Training. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), 129–143. <https://doi.org/10.1162/105474698565631>
- Walsh, C. M., Sherlock, M. E., Ling, S. C., & Carnahan, H. (2012). Virtual reality simulation training for health professions trainees in gastrointestinal endoscopy. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 6. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD008237.pub2>
- Wassom, B. D. (2015). Chapter 3—Privacy. In B. D. Wassom (Ed.), *Augmented Reality Law, Privacy, and Ethics* (pp. 43–69). Syngress. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800208-7.00003-X>
- Weech, S., Calderon, C. M., & Barnett-Cowan, M. (2020). Sensory Down-Weighting in Visual-Postural Coupling Is Linked With Lower Cybersickness. *Frontiers in Virtual Reality*, 1. <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.00010>
- Weech, S., Kenny, S., & Barnett-Cowan, M. (2019). Presence and Cybersickness in Virtual Reality Are Negatively Related: A Review. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00158>

- Weech, S., Kenny, S., Lenizky, M., & Barnett-Cowan, M. (2020). Narrative and gaming experience interact to affect presence and cybersickness in virtual reality. *International Journal of Human-Computer Studies*, 138, 102398. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2020.102398>
- Weech, S., Varghese, J. P., & Barnett-Cowan, M. (2018). Estimating the sensorimotor components of cybersickness. *Journal of Neurophysiology*, 120(5), 2201–2217. <https://doi.org/10.1152/jn.00477.2018>
- Weinbaum, S. G. (2004). *Pygmalion's Spectacles*. Kessinger Publishing, LLC.
- Welch, R. B. (1999). How Can We Determine if the Sense of Presence Affects Task Performance? *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 574–577. <https://doi.org/10.1162/105474699566387>
- Welch, R. B., Blackmon, T. T., Liu, A., Mellers, B. A., & Stark, L. W. (1996). The Effects of Pictorial Realism, Delay of Visual Feedback, and Observer Interactivity on the Subjective Sense of Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3), 263–273. <https://doi.org/10.1162/pres.1996.5.3.263>
- What does your VR headset know about you, and who is it telling?* (2018, April 20). Windows Central. <https://www.windowscentral.com/vr-and-your-privacy-how-are-these-companies-treating-your-data>
- Wheatstone, F. R. (1838). Contributions to the Physiology of Vision.—Part the First. On some remarkable, and hitherto unobserved, Phenomena of Binocular Vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 128, 371–394.
- Whyte, J. (2003). Industrial applications of virtual reality in architecture and construction. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 8(4), 43–50.
- Wiederhold, B. K., Jang, D. P., Kaneda, M., Cabral, I., Lurie, Y., May, T., Kim, I. Y., Wiederhold, M. D., & Kim, S. I. (2003). An Investigation Into Physiological Responses in Virtual Environments: An Objective Measurement of Presence. In *Towards CyberPsychology: Mind, Cognitions and Society in the Internet Age* (Giuseppe Riva&Carlo Galimberti (Eds)).
- Wilson, R. A., & Foglia, L. (2011). *Embodied Cognition*. <https://plato.stanford.edu/archives/fall2011/entries/embodied-cognition/#EnaCog>
- Wiltz, C. (2019, March 1). *The Story of Sega VR: Sega's Failed Virtual Reality Headset*. Design News. <https://www.designnews.com/electronics-test/story-sega-vr-segas-failed-virtual-reality-headset/74451237860349>
- Winn, W. (1993). *A conceptual basis for educational applications of virtual reality*. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-conceptual-basis-for-educational-applications-of-Winn/82e7231300a36ec891b674f0664d08f958f8119f>

- Wirth, W., Hartmann, T., Boecking, S., Vorderer, P. A., Klimmt, C., Schramm, H., Saari, T., Laarni, J., Ravaja, N., Gouveia, F. R., Biocca, F., Gouveia, L. B., Rebeiro, N., Sacau, A., Jäncke, L., Baumgartner, T., & Jäncke, P. (2007). A process model of the formation of spatial presence experiences. *Media Psychology*, 9(3), 493–525. <https://doi.org/10.1080/15213260701283079>
- Witkin, H.-A., & Asch, S. E. (1948). Studies in space orientation. IV. Further experiments on perception of the upright with displaced visual fields. *Journal of Experimental Psychology*, 38(6), 762–782. <https://doi.org/10.1037/h0053671>
- Witkin, H.-A., Dyk, R. B., Fattuson, H. F., Goodenough, D. R., & Karp, S. A. (1962). *Psychological differentiation: Studies of development* (pp. xii, 418). Wiley.
- Witkin, H.-A., & Goodenough, D. R. (1981). Cognitive styles: Essence and origins. Field dependence and field independence. *Psychological Issues*, 51, 1–141.
- Witkin, H.-A., Moore, C. A., Goodenough, D. R., & Cox, P. W. (1977). Field-Dependent and Field-Independent Cognitive Styles and Their Educational Implications. *Review of Educational Research*, 47(1), 1–64. <https://doi.org/10.2307/1169967>
- Witkin, H.-A., Oltman, P.-K., Raskin, E., & Karp, S.-A. (1971). *A manual for the Group Embedded Figures Test*. Mind Garden, Inc.
- Witmer, B. G., Jerome, C. J., & Singer, M. J. (2005). The Factor Structure of the Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*. <https://doi.org/10.1162/105474605323384654>
- Witmer, B. G., & Singer, M. F. (1994). *Measuring Presence in Virtual Environments*. United States Army Research Institute for the Behavioral Sciences. <https://apps.dtic.mil/docs/citations/ADA286183>
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225–240. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>
- Witte, K., Gierszewski, S., & Chouinard-Thuly, L. (2017). Virtual is the new reality. *Current Zoology*, 63(1), 1–4. <https://doi.org/10.1093/cz/zow119>
- Woman's Deceased Daughter "Resurrected" in VR: Unethical or the Future?* (2020). Virtual Reality Society. <https://www.vrs.org.uk/womans-deceased-daughter-resurrected-in-vr-unethical-or-the-future/>
- Won, A. S., Bailey, J., Bailenson, J., Tataru, C., Yoon, I. A., & Golianu, B. (2017). Immersive Virtual Reality for Pediatric Pain. *Children (Basel, Switzerland)*, 4(7). <https://doi.org/10.3390/children4070052>

- Woods, D. L., Wyma, J. M., Yund, E. W., Herron, T. J., & Reed, B. (2015). Factors influencing the latency of simple reaction time. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00131>
- World Medical Association. (2013). World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*, 310(20), 2191–2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>
- World report on vision*. (2019). <https://www.who.int/publications-detail-redirect/world-report-on-vision>
- Yee, N. (2017, January 19). Beyond 50/50: Breaking Down The Percentage of Female Gamers By Genre. *Quantic Foundry*. <https://quanticfoundry.com/2017/01/19/female-gamers-by-genre/>
- Younes, E., & Lioret, A. (2017). Sense of presence in oneiric virtual environments: Sketching the necessary and sufficient conditions. *Artificial Life Conference Proceedings*, 29, 600–605. https://doi.org/10.1162/isal_a_094
- Youngblut, C. (1998). *Educational Uses of Virtual Reality Technology*. (IDA-D-2128). INSTITUTE FOR DEFENSE ANALYSES ALEXANDRIA VA. <https://apps.dtic.mil/docs/citations/ADA339438>
- Youngblut, C., & Huie, O. (2003). The relationship between presence and performance in virtual environments: Results of a VERTS study. *IEEE Virtual Reality, 2003. Proceedings.*, 277–278. <https://doi.org/10.1109/VR.2003.1191158>
- Yu, X. (2011). Research and Practice on Application of Virtual Reality Technology in Virtual Estate Exhibition. *Procedia Engineering*, 15, 1245–1250. <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2011.08.230>
- Zahorik, P., & Jenison, R. L. (1998). Presence as Being-in-the-World. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(1), 78–89. <https://doi.org/10.1162/105474698565541>
- Zhou, Y., Wen, D., Lu, H., Yao, W., Liu, Y., Qian, W., & Yuan, J. (2020). The Current Research of Spatial Cognitive Evaluation and Training With Brain–Computer Interface and Virtual Reality. *Frontiers in Neuroscience*, 13. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01439>
- Ziarati, K., Khayami, R., Parvinnia, E., & Afroozi Milani, G. (2009). Virtual Collaboration Readiness Measurement a Case Study in the Automobile Industry. In H. Sarbazi-Azad, B. Parhami, S.-G. Miremadi, & S. Hessabi (Eds.), *Advances in Computer Science and Engineering* (pp. 913–916). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-89985-3_132
- Zimmerman, T. G. (1985). *Optical flex sensor* (United States Patent No. US4542291A). <https://patents.google.com/patent/US4542291A/en>

Zimmerman, T. G., & Lanier, J. Z. (1999). *Computer data entry and manipulation apparatus and method* (United States Patent No. US4988981B1). <https://patents.google.com/patent/US4988981B1/en>

11. À quelle distance pouviez-vous examiner les objets?

_____ | _____ | _____ | _____ | _____ | _____ | _____ |
PAS PROCHE PLUTÔT TRÈS
DU TOUT PROCHE PROCHE

12. Jusqu'à quel point pouviez-vous examiner les objets sous différents angles?

_____ | _____ | _____ | _____ | _____ | _____ | _____ |
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

13. Jusqu'à quel point étiez-vous impliqué(e) dans l'expérience vécue dans l'environnement virtuel?

_____ | _____ | _____ | _____ | _____ | _____ | _____ |
PAS DU TOUT MOYENNEMENT COMPLÈTEMENT
ENGAGÉ(E) ENGAGÉ(E) ABSORBÉ(E)

14. Jusqu'à quel point avez-vous ressenti un délai séparant vos actions de leurs conséquences?

_____ | _____ | _____ | _____ | _____ | _____ | _____ |
AUCUN DÉLAI LONG
DÉLAI MODÉRÉ DÉLAI

15. À quel rythme vous êtes-vous adapté(e) à l'expérience vécue dans l'environnement virtuel?

_____ | _____ | _____ | _____ | _____ | _____ | _____ |
PAS ADAPTÉ(E) LENTEMENT EN MOINS
DU TOUT D'UNE MINUTE

16. En termes d'interactions et de déplacements dans l'environnement virtuel, jusqu'à quel point vous sentiez-vous compétent(e) à la fin de l'expérience?

_____ | _____ | _____ | _____ | _____ | _____ | _____ |
PAS RAISONNABLEMENT TRÈS
COMPÉTENT(E) COMPÉTENT(E) COMPÉTENT(E)

17. Jusqu'à quel point la qualité visuelle de l'appareillage graphique vous a-t-elle incommodé(e) dans l'exécution des tâches requises?

_____	_____	_____	_____	_____	_____
PAS DU TOUT		ASSEZ		TÂCHES	
		INCOMMODÉ(E)		COMPLÈTEMENT	
				EMPÊCHÉES	

18. Dans quelle mesure les mécanismes de contrôle de votre mouvement ont-ils interféré avec l'exécution des tâches requises?

_____	_____	_____	_____	_____	_____
PAS DU TOUT		ASSEZ		GRANDEMENT	
		INTERFÉRÉ		INTERFÉRÉ	

19. Jusqu'à quel point êtes-vous parvenu(e) à vous concentrer sur les tâches requises plutôt que sur les mécanismes utilisés pour effectuer lesdites tâches?

_____	_____	_____	_____	_____	_____
PAS DU TOUT		ASSEZ		COMPLÈTEMENT	

RÉPONDEZ SI L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL COMPRENAIT DES SONS :

20. Dans quelle mesure les aspects auditifs de l'environnement vous invitaient-ils à vous y impliquer?

_____	_____	_____	_____	_____	_____
PAS DU TOUT		ASSEZ		COMPLÈTEMENT	

21. Dans quelle mesure arriviez-vous à identifier correctement les sons produits dans l'environnement?

_____	_____	_____	_____	_____	_____
PAS DU TOUT		ASSEZ		COMPLÈTEMENT	

22. Dans quelle mesure arriviez-vous à localiser correctement les sons produits dans l'environnement?

_____	_____	_____	_____	_____	_____
PAS DU TOUT		ASSEZ		COMPLÈTEMENT	

Annexe 2 : Questionnaire sur les Cybermalaises



Questionnaire sur les cybermalaises*

Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO
(Traduit de Kennedy, R.S. et al., 1993)

Numéro _____ Date _____

Consignes : Encercliez à quel point chaque symptôme ci-dessous vous affecte présentement.

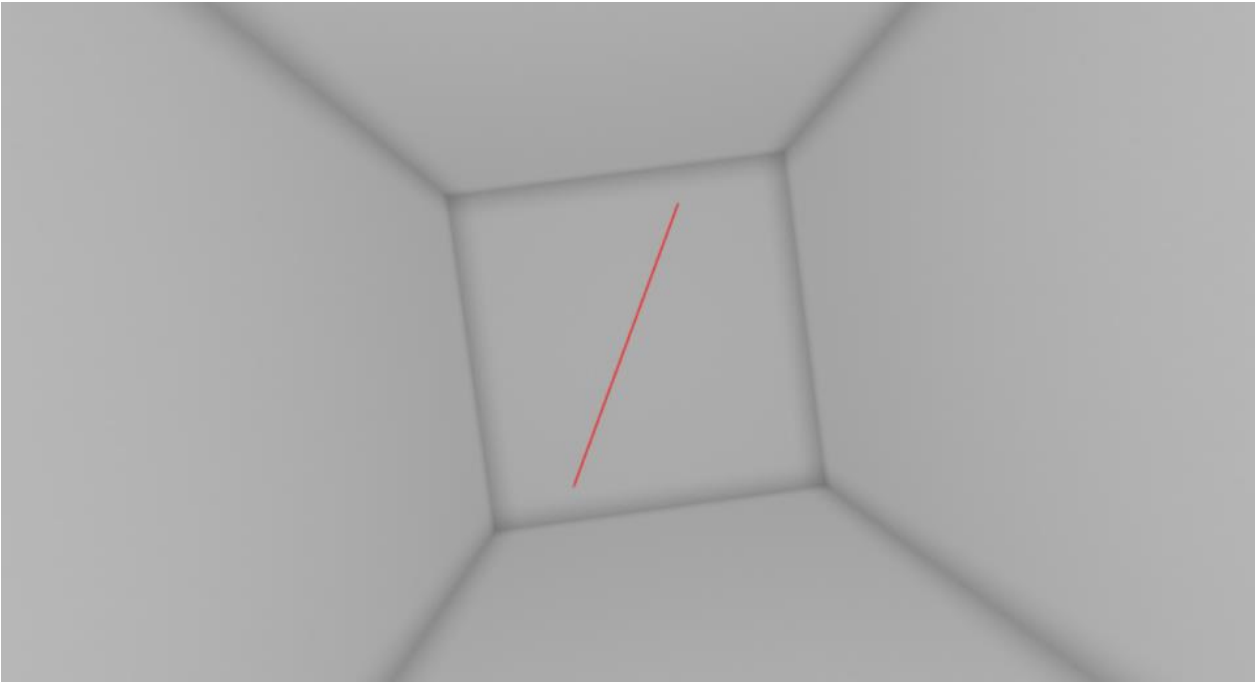
- | | | | | |
|---|--------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| 1. Inconfort général | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 2. Fatigue | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 3. Mal de tête | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 4. Fatigue des yeux | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 5. Difficulté à faire le focus | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 6. Augmentation de la salivation | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 7. Transpiration | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 8. Nausées | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 9. Difficulté à se concentrer | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 10. Impression de lourdeur dans la tête | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 11. Vision embrouillée | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 12. Étourdissement les yeux ouverts | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 13. Étourdissement les yeux fermés | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 14. *Vertiges | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 15. **Conscience de l'estomac | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 16. Rots | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |

* Les vertiges sont vécus comme une perte de l'orientation par rapport à la position verticale.

** L'expression « conscience de l'estomac » est habituellement utilisée pour désigner un sentiment d'inconfort sans nausée.

Dernière version : Mars 2013

Annexe 3 : Vue première personne du Test de la Baguette et du Cadre virtuel



Résumé

La réalité virtuelle s'est imposée comme un nouveau paradigme de la recherche et des applications scientifiques. La capacité de cette technologie à simuler des situations complexes sur mesure offre aux chercheurs la possibilité d'étudier des comportements possédant contrôle méthodologique et dimension écologique. Cette dernière est rendue possible par l'émergence du sentiment de présence, la sensation « d'être là », phénomène au cœur des études *in virtuo*. Le présent travail s'inscrit dans un cadre méthodologique et fondamental visant à faire avancer l'émergence d'un corps de connaissances sur la réalité virtuelle et son sentiment de présence. En effet, la compréhension globale de ce dernier demeure très limitée, notamment au regard de ses liens avec la performance en réalité virtuelle. Que ce soit dans un but de diagnostic ou d'investigation du comportement humain, la question de la relation entre sentiment de présence et performance est pourtant cruciale : si la présence favorise la performance, par exemple la performance à un test neuropsychologique, celle-ci devient un biais systématique inhérent à l'outil qu'il est nécessaire de contrôler pour toute expérimentation rigoureuse. Si cette question demeure peu étudiée dans la littérature c'est parce qu'elle est largement complexifiée par les interactions entre tout un ensemble de variables adjacentes – genre, cybermalaises, style cognitif, expérience des jeux vidéo –, mais aussi parce que la performance peut prendre des myriades de formes différentes et qu'il est ainsi particulièrement ardu d'inférer une causalité directionnelle. Afin d'explorer cette question, le présent travail propose trois expérimentations sur trois différents types d'évaluation : fonctions exécutives, cognition spatiale, apprentissage sémantique. Les données ainsi recueillies font également l'objet d'analyses transversales destinées à comparer les expérimentations. Ensemble, ces résultats semblent distinguer l'existence de deux composants de la réalité virtuelle. Le premier, le profil cognitif, est constitué par les facteurs humains individuels interagissant avec les facteurs systèmes – notamment le degré d'intégration de la tâche – pour moduler le deuxième, l'expérience utilisateur. De cette expérience utilisateur dépendent le sentiment de présence, la performance, mais aussi leur relation. Ce modèle, présenté en conclusion, est discuté au regard d'approches théoriques différentes de la cognition et permet de dresser une liste de recommandations et de perspectives pour les utilisateurs de la réalité virtuelle, notamment les possibilités d'estimer a priori l'expérience utilisateur d'un individu.

Mots-clés : immersion, évaluation neuropsychologique, environnements virtuels, interaction homme-machine, cybermalaises, jeux vidéo, dépendance au champ, style cognitif, genre, ressources attentionnelles.