

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

**ÉCOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUE, SCIENCES DE
L'INFORMATION ET DE L'INGÉNIEUR**

THÈSE présentée par :

Sabah BOUSTILA

soutenue le : 25 Mai 2016



pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université de Strasbourg**

**Conception et évaluation d'un outil de revue
de projet architectural en réalité virtuelle :**
problématique de la perception des distances en
environnement virtuel

THÈSE dirigée par :

Mme. Dominique BECHMANN

Professeure des universités à l'Université de Strasbourg

RAPPORTEURS :

M. Emmanuel Dubois

Professeur des universités à l'Université Paul Sabastier de Toulouse

M. Daniel Mestre

Directeur de recherche à Aix-Marseille Université

EXAMINATEURS :

M. Antonio Capobianco

Maître de conférence à l'Université de Strasbourg

Mme. Birgitta Dresp

Chargée de recherche à l'Université de Strasbourg

Mme. Indira Thouvenin

Professeure à l'Université de Technologie de Compiègne

Table des matières

I	Introduction et contexte	17
1	La réalité virtuelle	19
1.1	Définitions de bases	19
1.1.1	Définition et historique de la réalité virtuelle	19
1.1.2	Définition des environnements virtuels	21
1.2	Exemples d'applications de la réalité virtuelle	22
1.3	L'architecture et la réalité virtuelle	26
1.3.1	Les formes de représentation des maquettes numériques	26
1.3.2	L'usage de la réalité virtuelle	27
1.3.3	La revue de projet architectural	32
1.4	Conclusion	33
2	La perception des distances en environnement virtuel	35
2.1	Contexte théorique	36
2.1.1	Le principe de la perception	37
2.1.2	La perception visuelle de la profondeur	38
2.1.3	La problématique de la perception des distances dans les environnements virtuel et réel	39
2.2	Les facteurs affectant la perception des distances	40
2.2.1	Facteurs techniques	40
2.2.2	Facteurs compositionnels	49
2.2.3	Facteurs humains	60
2.3	Les améliorations de la perception des distances en environnement virtuel	61
2.3.1	La correction des estimations	61
2.3.2	Les avatars	62
2.3.3	Le champ de vision	65
2.4	Facteurs identifiés et retenus pour nos expérimentations	70
2.4.1	Facteurs de l'expérimentation I	70
2.4.2	Facteur de l'expérimentation II	71
2.4.3	Facteurs de l'expérimentation III	71
2.5	Conclusion	71

II	Conception et évaluation de l’outil de revue de projet architectural en environnement virtuel	73
3	Conception de l’outil de revue de projet	75
3.1	Modèle de référence de l’immersion et de l’interaction	76
3.2	Conception de l’outil de revue de projet architectural CIMBEES	77
3.2.1	Niveau fonctionnel : identification des besoins	77
3.2.2	Niveau physique : interfaces sensorielles et motrices	79
3.2.3	Niveau cognitif : métaphores d’interaction	80
3.3	La conception des maquettes numériques	81
3.3.1	Modélisation de maquettes numériques	81
3.3.2	Export des maquettes numériques	83
3.4	Conclusion	84
4	Évaluation de l’outil de revue de projet	85
4.1	Évaluation des outils de réalité virtuelle	86
4.1.1	Méthode d’évaluation de l’utilisabilité	86
4.1.2	Types d’évaluation de l’utilisabilité des outils de réalité virtuelle dans le domaine architectural	88
4.2	Méthodes d’estimation des distances	91
4.2.1	L’estimation verbale	91
4.2.2	Les actions guidées	92
4.2.3	Les correspondances perceptuelles	95
4.2.4	Le temps imaginé de la marche	96
4.2.5	Jugement de faisabilité	97
4.2.6	Bilan	98
4.3	L’évaluation de l’outil de revue de projet CIMBEES	99
4.3.1	Questionnaire de compréhension spatiale (CS)	99
4.3.2	Débriefing semi-guidé	105
4.4	Conclusion	105
III	Expérimentations et résultats	107
5	Expérimentation I : L’influence du profil cognitif, l’ameublement des maisons et la vitesse de navigation sur l’estimation des distances lors des visites virtuelles de maison	111
5.1	Les facteurs identifiés et motivations	112
5.1.1	La vitesse de navigation	112
5.1.2	L’ameublement des maisons	113
5.1.3	Le profil cognitif	113
5.2	Protocole expérimental	114
5.2.1	La méthode	114
5.2.2	Matériel et stimuli visuels	114
5.2.3	Participants	115

5.2.4	Mesures et évaluation du questionnaire de compréhension spatiale (CS)	115
5.2.5	Hypothèses	118
5.2.6	Procédure	119
5.3	Résultats	120
5.3.1	Les tendances dans les estimations	121
5.3.2	Profil cognitif	123
5.3.3	Vitesse de navigation	125
5.3.4	L'ameublement des maisons	126
5.3.5	L'orientation et la visualisation spatiale	128
5.3.6	L'espace de confort	128
5.4	Discussion	128
5.4.1	Les tendances dans les estimations	128
5.4.2	Profil cognitif	129
5.4.3	Vitesse et ameublement des maisons	130
5.5	Conclusion	131

6 Expérimentation II : La projection hybride pour élargir le champ de vision géométrique vertical

133

6.1	Projection hybride pour élargir le champ de vision vertical	134
6.1.1	Problématique et motivations	134
6.1.2	Terminologies	135
6.1.3	Principe de la projection hybride	135
6.1.4	Mise en œuvre de la projection hybride	137
6.1.5	Objectifs	140
6.2	Protocole expérimental	140
6.2.1	La méthode	141
6.2.2	Matériel et stimuli visuels	141
6.2.3	Participants	141
6.2.4	Mesures et évaluation	142
6.2.5	Hypothèses	143
6.2.6	Procédure	143
6.3	Résultats	143
6.3.1	La projection	143
6.3.2	L'ameublement des maisons	147
6.4	Discussion	149
6.4.1	Les tendances dans les estimations	149
6.4.2	La carte cognitive	149
6.4.3	L'ameublement des maisons et l'habitabilité	150
6.4.4	La difficulté de la tâche et la présence	151
6.4.5	Le mal du simulateur	152
6.5	Conclusion	153

7	Expérimentation III : L'influence de la stéréoscopie et du suivi de la tête sur l'estimation des distances lors des visites virtuelles de maison	155
7.1	Introduction	156
7.2	Protocole expérimental	157
7.2.1	Méthode	157
7.2.2	Matériel et stimuli	158
7.2.3	Participants	158
7.2.4	Mesures et évaluation	158
7.2.5	Hypothèses	158
7.2.6	Procédure	158
7.3	Résultats	159
7.3.1	Les tendances dans les estimations	159
7.3.2	Stéréoscopie et suivi de la tête	160
7.4	Discussion	162
7.4.1	Estimation des distances	162
7.4.2	Habitabilité	163
7.4.3	Les tendances dans les estimations	164
7.4.4	Difficulté de la tâche	164
7.4.5	La carte cognitive	164
7.4.6	La présence	165
7.4.7	Mal du simulateur	165
7.5	Conclusion	166
8	Conclusion	169
8.1	Bilan	169
8.2	Perspective	172
8.2.1	Le profil cognitif	172
8.2.2	La projection hybride	172
8.2.3	La stéréoscopie et le suivi de la tête	173
	Bibliographie	175
A	Exemples du questionnaire de compréhension spatiale, partie 1 (CS1)	185
B	Exemples de réponses au questionnaire de compréhension spatiale, partie 2 (CS2)	195

Table des figures

0.1	L'utilisateur est immergé dans un environnement virtuel dans lequel il peut naviguer et visiter l'environnement 3D à l'aide de la wiimote.	13
1.1	Figure illustrant le premier cinéma immersif : Sensorama.	20
1.2	Le premier prototype de casque virtuel développé à l'Université d'Utah. Image tirée de [Sut68].	20
1.3	Simulateur de passerelle de l'école Navale de Brest.	23
1.4	Simulateur d'insertion d'une aiguille pour une biopsie rénale. Image tirée de [HPE ⁺ 15].	24
1.5	Simulateur d'entraînement en métrologie. Image tirée de [BBB ⁺ 15].	24
1.6	Simulateur de RV de l'effet Venturi. Image tirée de [DLE ⁺ 13].	25
1.7	Exemple d'une séance de travail entre les concepteurs sur le design extérieur d'un modèle de véhicule. La visualisation tridimensionnelle immersive du modèle se fait dans un CAVE avec une projection sur cinq face.	25
1.8	Exemple d'une revue de projet architectural dans un CAVE. L'utilisateur teste l'ouverture de la porte des toilettes lorsque la porte d'entrée est ouverte. Image tirée de [DAM ⁺ 07].	26
1.9	Exemple d'une conception en environnement virtuel immersif. Dans l'image de gauche l'utilisateur rajoute une fenêtre à la maison. Dans l'image de droite il redimensionne la porte. Image tirée de [MCBT04]	28
1.10	L'utilisateur modifie la maquette numérique en mode mixte. Image tirée de [CVC ⁺ 11]	29
1.11	Exemple de mode de visualisation en EVI. La figure gauche représente une vue en perspective, la figure droite représente une vue balcon. Image tirée de [DRRT07]	29
1.12	L'utilisateur déplace la table près du lit pour évaluer l'espace de la pièce. Image tirée de [DAM ⁺ 07].	30
1.13	Session de revue de projet avec les juges dans un CAVE. Image tirée de [MS06].	31
1.14	Visualisation du modèle 4D d'une salle d'une centrale nucléaire en environnement virtuel immersif. Image tirée de [YMBH05]	31
1.15	Plusieurs participants sont immergés ensemble pour une revue de projet collaborative. Image tirée de [MMP06].	32
1.16	Schéma résumant le processus de revue de projet CIMBEES.	33
2.1	Composition anatomique de l'œil humain. Image tirée du traité de la réalité virtuel [FMA ⁺ 06].	37
2.2	Les différentes catégories de facteurs influant la perception des distances en EV, image tirée est traduite en français de [RVH13].	40

2.3	Exemple des écrans : écrans sphérique, grand écran plat immersif et cabine de simulation (de gauche à droite). Image tirée de [PdIRK ⁺ 13].	42
2.4	Un participant observant la scène virtuelle à travers le mur carrelé. Image tirée de [KSS ⁺ 09].	43
2.5	Casque pour simuler le poids du HMD. Image tirée de [WCCRT09].	43
2.6	Expérimentation en environnement réel avec restriction sur la visibilité du corps. Image tirée de [CRWGT05].	44
2.7	À gauche : image schématique de la projection avec l'écran semi sphérique. À droite : un utilisateur immergé en EV. Image tirée de [PdIRK ⁺ 13].	45
2.8	À gauche : image schématique de la projection avec le LSID. À droite : un utilisateur immergé en EV. Image tirée de [PdIRK ⁺ 13].	46
2.9	Exemple d'un objet affiché derrière l'écran avec une distance négative. Image tirée de [BASOL15].	48
2.10	Environnement réel utilisé pour l'estimation des distances avec la vision mono/binoculaire. Image tirée de [CRWGT05].	48
2.11	L'estimation des distances avec différents types de vision : monoculaire et binoculaire. Image tirée de [WGTCR08].	49
2.12	Trois niveaux de réalisme différents : un rendu à haute définition à partir de photo panoramique réaliste, rendu avec simple texture et éclairage, rendu en fil-de-fer, respectivement de gauche à droite. Image tirée de [TWG ⁺ 04].	51
2.13	Environnement réel (gauche) et l'environnement virtuel reproduit (droite) utilisé dans l'expérimentation. Image tirée de [GNP ⁺ 10].	51
2.14	Environnement réel (gauche) et l'EV reproduit (milieu et droite) utilisé dans l'expérimentation. La figure de droite illustre un exemple de la cible en EV. Image tirée de [PdIRK ⁺ 13].	52
2.15	Le sujet est placé sur la partie du sol en béton et la cible est placée sur le gazon. Image tirée de [SOH98a].	53
2.16	L'estimation des distances dans quatre conditions en variant la présence des objets familiers. Image tirée de [Sim14].	53
2.17	Variation de l'ameublement et de la présence de l'indice d'échelle entre les conditions pour l'estimation des dimensions. Image tirée de [VCOH14].	54
2.18	Résultat de l'estimation des distances dans l'intervalle de 2 à 5.5m. Image tirée de [ATDIR ⁺ 10].	56
2.19	Estimation des distances en environnement réel avec le champ de vision limité et restriction sur la rotation de la tête. Image tirée de [CRWGT05].	57
2.20	La figure de droite montre l'EV utilisé pour la tâche d'interaction. La figure de gauche montre la table placée dans l'environnement réel pour fournir le retour haptique. Image tirée de [IRA06].	57
2.21	Influence de la navigation (proche ou loin) sur l'estimation des distances. Image tirée de [KHSS14].	58
2.22	La tâche d'estimation des distances égocentriques, en réglant la distance à la cible selon la distance parcourue (activement ou passivement). Image tirée de [CBB12].	59
2.23	Exemple des corrections données aux participants pour les distances égocentriques (gauche) et exocentriques (droite). Image tirée de [RW05].	62
2.24	La tâche d'estimation des distances après la phase d'interaction en EV. Image tirée de [RW07].	63
2.25	De gauche à droite : scène virtuelle non réaliste et position de l'avatar dynamique dans cette dernière. Image tirée de [PRKI10].	64

2.26	Sur les deux lignes : trois représentations du corps humain en EV, de gauche à droite : avatar dynamique, avatar statique, marqueur au sol. De haut en bas : représentation à la première personne et représentation à la troisième personne. Image tirée de [MCRTB10].	64
2.27	De gauche à droite : salle réelle de l'expérimentation et la scène virtuelle correspondante avec un avatar. Image tirée de [RWCB12].	65
2.28	Le i-Cone : écran semi-sphérique avec quatre projecteurs. Image tirée de [THIT04].	66
2.29	Le Twister : le principe de la vision auto-stéréoscopique basé sur les matrices de LEDs. Image tirée de [THIT04].	67
2.30	Utilisateur immergé dans le Twister III. Image tirée de [THIT04].	67
2.31	Le prototype du FlyViz : casque combinant un HMD et un système d'acquisition d'image. Image tirée de [ALM ⁺ 12].	68
2.32	Modèle de maillage pour un CAVE avec 5 écrans. Le cube gauche représente la coupe sur le maillage source. Cube droit représente le maillage cible. Image tirée de [PPZ ⁺ 12].	68
2.33	L'algorithme de la cartographie conforme entre un CAVE à 5 écrans et un CAVE à 6 écrans. Image tirée de [PPZ ⁺ 12].	69
2.34	Image panoramique formées de trois images. Image tirée de [HKL07].	69
3.1	Schéma technocentrique de référence pour l'immersion et l'interaction en réalité virtuelle tel que défini dans [FMA ⁺ 06].	76
3.2	Les dispositifs d'affichage de la plateforme de réalité virtuelle <i>IN VIRTUO</i> . Image de gauche représente le Workbench. Image de droite représente le mur immersif	80
3.3	Les périphériques d'interaction de la plateforme de réalité virtuelle <i>IN VIRTUO</i> . De gauche à droite : le flystick, la Wiimote et les gants de données.	80
3.4	Étape de la modélisation du modèle 3D à partir du plan 2D avec <i>Blender</i> . L'image représente le plan de la maison à l'échelle réelle.	81
3.5	Modèle 3D de la maison créée avec <i>Blender</i>	82
3.6	Modèle d'une maison T3 Meublée que nous avons utilisé dans nos expérimentations.	83
3.7	Exemple des sources de lumières et des couleurs ajoutées à un modèle avec <i>3ds Max</i>	83
4.1	Classification des problèmes discutés dans un CAVE lors des sessions de revue de projet selon le framework DEEPAND. Image tirée de [MS06]	89
4.2	Le framework de l'évaluation séquentielle, image tirée de [GHS99]	90
4.3	La figure à gauche illustre le principe de l'estimation avec la marche directe. La figure à droite illustre le principe de l'estimation avec la marche indirecte triangulée. Image tirée de [KSS ⁺ 09].	92
4.4	Figure illustre la marche aveugle triangulée avec un angle de 70°. Image tirée de [TWG ⁺ 04].	93
4.5	Figure illustre le principe de la marche aveugle triangulée basé sur trois segments de marche. Image tirée de [RBS09].	94
4.6	Figure illustre l'estimation des distances avec la tâche de lancer. Image tirée de [SCRTW05].	94
4.7	Stimuli visuels utilisés pour l'estimation avec la méthode d'ajustement : l'utilisateur règle la taille de la bouteille virtuelle en fonction de sa position en EV et de la taille de la vraie bouteille. Image tirée de [KPSD08].	95
4.8	Figure illustre l'estimation des distances avec la bissection en environnement réel. Image tirée de [LSR06].	96

4.9	Figure illustre l'estimation des distances avec le jugement de faisabilité, le sujet juge la possibilité de passer entre les deux poteaux. Image tirée de [GSCRT10].	98
4.10	Figure illustre un plan d'une maison T2 visitée par les sujets dans l'expérimentation.	100
4.11	Exemple de la feuille sur laquelle le participant dessine le plan de la maison.	103
4.12	La figure de gauche montre un exemple de plan d'une maison, la figure de droite montre un exemple de la carte cognitive CS2, avec l'agencement des pièces et le chemin de navigation dessiné par un participant.	104
5.1	Exemple de visite virtuelle : avec des positions différentes lors de la visite d'une maison meublée. Le chemin de navigation est représenté en fil d'Ariane en vert.	119
5.2	Boite à moustache représentant la distribution de l' <i>estimation des distances</i> en fonction du profil cognitif VAK.	121
5.3	Boite à moustache représentant la distribution de l' <i>estimation des distances</i> en fonction de la vitesse.	121
5.4	Boite à moustache représentant la distribution de la perception des tailles en fonction du profil cognitif VAK.	122
5.5	Boite à moustache représentant la distribution de l'habitabilité en fonction du profil cognitif VAK.	123
6.1	Une vue de la scène que voit le participant se trouvant à l'entrée des toilettes : à gauche avec la projection perspective et à droite avec la projection hybride. La vue sur l'image de droite permet à l'utilisateur de mieux voir le siège des toilettes permettant de créer une image mentale plus précise sur l'environnement.	135
6.2	Le principe de la projection hybride et les différents paramètres de rendu.	136
6.3	Rendu d'une scène virtuelle avec un champ de vision horizontal de 360° en utilisant la projection Hammer. Image tirée de [ALMM14]	137
6.4	L'espace des directions utilisé pour le calcul de rendu.	138
6.5	La paramétrisation de l'espace des directions.	139
6.6	Boite à moustache représentant la distribution de l' <i>estimation des distances</i> en fonction du type de projection.	144
6.7	Boite à moustache représentant la distribution de la perception des taille en fonction du type de projection.	145
6.8	Boite à moustache représentant la distribution de l'habitabilité en fonction du type de projection.	146
6.9	Interaction entre l'ameublement et le type de projection sur l'habitabilité.	148
7.1	Distribution des écarts moyens de l'estimation des distances dans les trois conditions.	160
7.2	Distribution des écarts moyens de la perception des tailles et de l'habitabilité dans les trois conditions.	160
B.1	Vue du haut de la première maison meublée (modèle 1).	196
B.2	Carte cognitive (CS2) du modèle 1 dessinée par le participant X.	197
B.3	Carte cognitive (CS2) du modèle 1 dessinée par le participant Y.	198
B.4	Vue du haut de la deuxième maison meublée (modèle 2).	199
B.5	Carte cognitive (CS2) du modèle 2 dessinée par le participant X.	200

B.6	Carte cognitive (CS2) du modèle 2 dessinée par le participant <i>Y</i>	201
B.7	Vue du haut de la troisième maison meublée (modèle 3).	202
B.8	Carte cognitive (CS2) du modèle 3 dessinée par le participant <i>X</i>	203
B.9	Carte cognitive (CS2) du modèle 3 dessinée par le participant <i>Y</i>	204

Introduction

La réalité virtuelle (noté RV) permet d'immerger un utilisateur dans un monde virtuel généré par un système informatique et d'interagir avec ce dernier en temps réel. Le principal facteur d'immersion est le dispositif utilisé pour afficher l'environnement virtuel : totalement immersif comme les Head-Mounted-Display (HMD) ou semi immersif comme les grands écrans. L'interaction entre l'environnement virtuel et l'utilisateur peut aller de la navigation dans la scène à la manipulation des objets à l'aide de périphériques d'interaction. L'objectif de cette technologie est d'immerger l'utilisateur dans un prototype ou une reproduction d'un environnement réel à des fins diverses comme la simulation ou la revue de projet. Nous illustrons, en figure 0.1, un utilisateur immergé dans une maison virtuelle affichée sur un grand écran immersif où à l'aide d'une *wiimote*, il peut naviguer dans la scène 3D et visiter la maison.



FIGURE 0.1: L'utilisateur est immergé dans un environnement virtuel dans lequel il peut naviguer et visiter l'environnement 3D à l'aide de la wiimote.

Par rapport aux stations de travail classiques, grâce au principe de la stéréoscopie, la réalité virtuelle enrichit la perception et l'interaction d'une dimension supplémentaire, la profondeur. D'autres facteurs d'immersion comme le suivi de la position de l'utilisateur qui permet de changer le point de vue sur la scène selon les mouvements de la tête, offrent une interaction directe et rapprochent de la perception en environnement réel. Cette avancée permet d'exploiter l'environnement virtuel et d'examiner les objets présents de manière plus naturelle.

Ces dernières années, la réalité virtuelle est de plus en plus exploitée dans de nombreux domaines. Elle est devenue un élément important dans la phase de développement d'une solution, notamment dans le domaine architectural. Les environnements virtuels sont utilisés pour visualiser à l'échelle 1 : 1 (taille réelle) les maquettes numériques de maison avant la phase de construction. Le client est immergé dans l'environnement virtuel de la maison qu'il a choisi auparavant sur un plan 2D. Il a la possibilité d'explorer

l'environnement simulant une visite réelle de la maison. Cette étape représente un gain de temps et d'argent important dans le processus de vente/achat et de conception. En effet, la RV procure un moyen de commercialisation pertinent aux architectes. En permettant aux acheteurs potentiels de faire une visite virtuelle, le client peut se projeter plus facilement et se faire une idée de ce que pourrait être sa future maison et par conséquent, peut déclencher plus rapidement la signature d'un précontrat. Par ailleurs, dans le processus de conception, la revue de projet en environnement virtuel permet à l'architecte d'expliquer et d'accompagner le client dans le choix des détails constructifs (nombre de pièces, surfaces, etc.) et des finitions (revêtements sols/murs, etc.) afin d'éviter les mauvaises surprises après la construction.

Toutefois, si la RV offre une immersion avantageuse et propose une interaction intuitive, la perception des distances en environnement virtuel reste problématique. Plusieurs études ont montré que l'estimation des distances en environnement virtuel est différente de l'estimation en environnement réel. Même avec l'utilisation de la stéréoscopie, la perception des distances est difficile à appréhender. De multiples facteurs peuvent être à l'origine de ce problème, comme les dispositifs d'affichage, le champ de vision restreint, la qualité graphique, etc. [RVH13]. Ces différents facteurs semblent influencer la perception des distances et par conséquent, les décisions prises en environnement virtuel.

Notre travail s'inscrit dans le cadre d'un projet architectural : le projet CIMBEES. Nous voulons introduire la réalité virtuelle dans la revue de projet afin de valider les maquettes numériques de maison avant la phase de construction. Dans ce cadre applicatif, la perception des distances constitue un élément majeur pour la prise de décision. L'objectif de notre travail est d'identifier les facteurs influençant la perception des distances et de proposer des solutions permettant de l'améliorer.

Dans la partie I du rapport, dans le premier chapitre, nous rappelons quelques définitions de la réalité virtuelle et nous donnons un historique succinct. Par la suite, nous présentons des exemples d'application. Parmi les domaines utilisant la RV nous traitons le domaine dans lequel s'inscrit notre travail : la revue de projet architectural en EV. Nous développons les apports de la réalité virtuelle à ce domaine. Nous présentons la revue de projet architectural, le cadre applicatif de notre travail et nous détaillons particulièrement le cadre du projet CIMBEES.

Dans le chapitre 2, nous positionnons la problématique de la perception des distances qui peut être altérée par plusieurs facteurs que nous présentons. En outre nous présentons quelques solutions proposées dans l'état de l'art pour l'améliorer.

Dans la partie II, nous présentons les deux phases principales de notre travail : la conception et l'évaluation de l'outil de revue de projet architectural en environnement virtuel. Dans le chapitre 3, d'abord nous présentons la phase de conception et les principales étapes. Nous nous intéressons particulièrement à la conception de l'outil de revue de projet CIMBEES. Puis, nous présentons la deuxième phase de notre travail : l'évaluation. Dans le chapitre 4, après un aperçu des méthodes d'évaluation des outils de RV, nous présentons les types d'évaluation des outils de RV dans le domaine architectural. Puis, nous présentons l'évaluation de notre outil de revue de projet basée sur l'évaluation de la perception des distances. Avant de décrire la méthode et la stratégie suivies pour mener cette évaluation, nous rappelons les différentes méthodes d'estimation des distances.

Dans la partie III, nous déployons les techniques d'évaluation que nous avons définies dans le cadre de deux études expérimentales. Dans le chapitre 5, nous nous intéressons à l'étude de la problématique de la perception des distances avec notre outil de revue de projet. La première expérimentation porte sur l'étude de l'influence de trois facteurs sur la perception des distances : 1) le profil cognitif, 2) le contexte

environnemental et 3) la vitesse de navigation. Après un bilan des résultats obtenus, nous proposons des lignes directrices pour la conception.

Dans le chapitre 6, nous proposons dans un premier temps la projection hybride, une technique d'affichage offrant un champ de vision vertical plus large. Cette technique a pour objectif d'améliorer la perception des objets proches et de l'espace personnel. Dans un deuxième temps, nous présentons l'étude expérimentale portant toujours sur l'évaluation de la perception des distances pour évaluer l'outil de revue de projet avec cette nouvelle technique d'affichage. Nous détaillons le protocole mis en place et les résultats obtenus.

La projection hybride étant sans stéréoscopie ni suivi de la tête, nous voulons vérifier la nécessité d'améliorer la projection hybride en rajoutant ces deux facteurs dans le futur. Dans le chapitre 7, nous concevons un protocole expérimental afin d'examiner l'influence de la vision stéréoscopique et le suivi de la tête sur la perception des distances. Nous finissons ce rapport par quelques conclusions et perspectives que nous proposons dans notre cadre de notre travail.

Première partie

Introduction et contexte

La réalité virtuelle

Sommaire

1.1	Définitions de bases	19
1.1.1	Définition et historique de la réalité virtuelle	19
1.1.2	Définition des environnements virtuels	21
1.2	Exemples d'applications de la réalité virtuelle	22
1.3	L'architecture et la réalité virtuelle	26
1.3.1	Les formes de représentation des maquettes numériques	26
1.3.2	L'usage de la réalité virtuelle	27
1.3.3	La revue de projet architectural	32
1.4	Conclusion	33

Dans ce premier chapitre, nous introduisons la technologie de la réalité virtuelle (RV) ainsi qu'un historique succinct de son développement. Nous définissons les terminologies utilisées dans ce rapport. Nous présentons quelques applications en nous intéressant plus particulièrement au domaine architectural. Nous discutons l'intérêt et les fonctionnalités qu'apporte la RV à ce domaine. Notamment, la revue de projet architectural en environnement virtuel (EV) qui est le contexte applicatif dans lequel se place notre travail. Nous donnons un aperçu des phases de la revue de projet architectural avant de présenter la revue de projet CIMBEES.

1.1 Définitions de bases

1.1.1 Définition et historique de la réalité virtuelle

Qu'est ce que la « réalité virtuelle » ? Plusieurs définitions ont été données. Dans le traité de la réalité virtuelle [FMA⁺06], « *la réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou plusieurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs* ». Cette définition technique est basée sur deux termes clés : l'immersion et l'interaction qui caractérisent les applications de RV. Nous y trouvons aussi une autre définition qui définit la RV plutôt par sa finalité [FMA⁺06] : « *La finalité de la réalité*

virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice dans un monde artificiel, qui est soit imaginaire, soit symbolique, soit une simulation de certains aspects du monde réel ».

D'après ces deux définitions, la RV permet tout simplement d'immerger un utilisateur dans un monde virtuel généré par un système informatique et d'interagir avec ce dernier en temps réel.

L'expression de réalité virtuelle remonte aux années quatre-vingt, et fut introduite pour la première fois en 1985 par Jaron Lanier, l'un des fondateurs de la société *Visual Programming Language Research (VPL Research)*. Cependant, l'histoire de la RV débute réellement pendant les années cinquante et se développe avec l'essor des technologies et de l'informatique.

En 1956 apparait le premier cinéma immersif : « Sensorama », crée par Morton Heilig, c'est un appareil sous forme de boîte permettant la visualisation de films en 3D comme l'illustre la figure 1.1. Cette innovation permet d'immerger la personne dans la scène et de stimuler différents sens à l'aide d'un siège vibrant, de ventilateurs, des odeurs, etc.



FIGURE 1.1: Figure illustrant le premier cinéma immersif : Sensorama.

En 1963, Ivan Sutherland a développé « Sketchpad » la première interface graphique interactive. Puis, en 1966, fut créé le premier prototype de casque virtuel à l'Université d'Utah. Ce casque correspond à deux tubes cathodiques soutenus par un bras mécanique et connectés à un générateur d'image, comme le montre la figure 1.2.

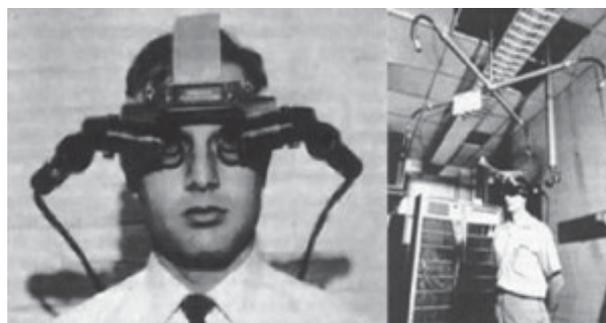


FIGURE 1.2: Le premier prototype de casque virtuel développé à l'Université d'Utah. Image tirée de [Sut68].

Ensuite, en 1970, Daniel Vickers équipe le casque virtuel avec un système de capture des positions et des mouvements de la tête. Les développements se succèdent avec la création du wand 3D, un bras à

retour haptique, un gant de donnée « DataGlove », etc. En 1989, la NASA crée un casque de visualisation LCD (Liquid Cristal Display). Ce développement rend les casques virtuels plus petits et plus légers. En 1992, apparait le concept des CAVEs (Computer Automatic Virtual Environment) développé par Tom DeFanti et Dan Sandin à l'université d'Illinois à Chicago. Le concept se base sur la projection des images stéréoscopiques sur 3 murs et le sol formant une pièce. Plusieurs personnes peuvent voir l'environnement à l'aide de lunettes stéréoscopiques et être immergées en même temps.

À partir des années quatre-vingt-dix, les technologies de la RV se mêlent au domaine des jeux vidéos comme iGlasses, Cybermaxx ou VFX-1, etc. qui sont des casques de RV. Cependant, ces développements ne trouvent pas un grand succès. Ce n'est qu'à la fin de cette décennie que la RV devient grand public avec l'apparition de la *Wimote de Nintendo*, un dispositif qui permet de contrôler notre mouvement dans les jeux vidéos et permettant davantage l'immersion du joueur. Cette tendance s'est confirmée avec l'apparition de la Kinect pour la Xbox, et la Playstation Move pour le Playstation. Dans la section suivante, nous présentons quelques exemples d'applications exploitant la RV.

1.1.2 Définition des environnements virtuels

La réalité virtuelle utilise plusieurs notions qui nécessitent d'être bien définies au préalable. Nous présentons les terminologies utilisées dans le reste de ce document.

Kalawskey [Kal99] définit plusieurs types d'EVs selon le degré d'immersion qu'ils procurent à l'utilisateur : EV non-immersif, EV semi-immersif et EV totalement immersif. L'EV est non-immersif lorsque la scène virtuelle générée par ordinateur est visualisée à travers un écran d'ordinateur classique, dans ce cas l'interaction peut se faire avec des dispositifs d'interaction assez standard tels qu'un clavier et une souris, ces EV ne permettent pas une vision à l'échelle réelle. L'EV semi-immersif est caractérisé par l'utilisation d'un affichage graphique haute performance, une échelle réelle et un champ de vision de plus de 60°. L'EV totalement immersif est caractérisé par un champ de vision large permettant à l'utilisateur de voir l'EV quelque soit sa direction de regard comme avec les HMDs.

Cette distinction entre les EVs selon le niveau d'immersion n'est pas souvent utilisée, Blascovich *et al.* [BLB⁺02] donne d'autres définitions :

- L'EV est défini comme l'information sensorielle synthétique qui conduit à une perception de l'environnement et de leur contenu avec l'impression d'être dans l'environnement.
- L'EV est dit immersif (EVI) lorsque l'EV entoure un individu comme dans un CAVE ou un HMD.
- L'EV est dit collaboratif lorsque plusieurs personnes peuvent être immergées dans le même scène virtuelle.

Ces définitions ne sont pas toujours respectées, certains travaux utilisent le terme EV pour désigner le stimulus visuel ou la scène virtuelle. Dans ce rapport nous allons utiliser les définitions suivantes :

- L'EV pour désigner un environnement utilisant les technologies de RV (périphériques d'interaction et dispositif d'affichage, etc.) sans considérer le niveau d'immersion qu'il procure.
- L'EVI pour désigner un EV qui permet la vision stéréoscopique, le suivi des mouvements et le changement de point de vue selon la direction de vue de l'utilisateur « la perspective ».

1.2 Exemples d'applications de la réalité virtuelle

De nos jours, la RV est utilisée dans de nombreux secteurs d'activités comme la médecine, l'industrie, l'éducation, l'architecture, etc.

Dans cette section nous allons voir quelques exemples de cadre applicatif. Néanmoins, le volume 4, *Applications de la réalité virtuelle* du Traité de la réalité virtuelle [FMA⁺06], propose une liste très détaillée de ces applications.

Nous commençons par le domaine militaire car historiquement il est le premier à avoir contribué au développement de la RV. Aujourd'hui elle y est largement utilisée, notamment comme outil de simulation. La RV permet de réaliser des simulations réalistes de situation délicates. Ces outils répondent parfaitement aux besoins de l'armée, que se soit pour l'armée de terre, l'aviation ou la marine, etc. Elle est utilisée pour des finalités diverses comme former les pilotes d'avion de chasse, l'entraînement au tir et la préparation des combattants à des missions spécifiques dans des situations critiques. En effet, l'EV peut servir de support d'entraînement collaboratif (en utilisant les CAVEs) pour entraîner des militaires au sein de champs de bataille virtuels en vue d'une préparation à une attaque militaire.

Le département de la défense des États-Unis est parmi les premiers à avoir utilisé la RV. Déjà à partir des années 80, la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) développa le réseau d'entraînement SIMNET [MT95], un réseau reliant 200 simulateurs de tanks qui sont les répliques d'un char M1. Ces tanks sont dotés d'un système de navigation, d'armes, de capteurs et de visualisateurs permettant d'afficher la scène virtuelle dans laquelle le tank est sensé être. Ces différents simulateurs sont dispersés physiquement aux États-Unis et en Allemagne et reliés entre eux à travers un réseau puissant permettant la communication entre les différents simulateurs qui se trouvent dans un même champ de bataille virtuel. Ce champ de bataille virtuel propose différents scénarios dédiés à l'entraînement d'équipes de tanks à des exercices avec plus de sécurité qu'en conditions réelles. La simulation offre un gain énorme à l'armée en évitant les risques de dommages matériels et personnels.

De même, la marine a développé des simulateurs de RV pour simuler les bâtiments maritimes et effectuer des exercices collaboratifs tel que le simulateur de RV de navigation de l'école Navale de Brest illustré dans la figure 1.3. Dans ce simulateur, la scène virtuelle est une reproduction fidèle de 3 passerelles de navire et un poste de commande. Le simulateur comporte des écrans de projection à 270° sur chaque passerelle pour que l'image soit la plus réaliste possible. L'EV permet d'établir un scénario pour apprendre aux élèves à se servir des différents outils de navigation et acquérir des gestes élémentaires du chef de quart à bord d'un bâtiment. Grâce à ce simulateur de RV, l'élève se met dans les conditions réelles d'un commandant de bord. Plusieurs paramètres peuvent être modifiés afin de rendre les exercices plus compliqués. Par exemple, changer la météo, la luminosité, l'agitation de la mer ou rajouter des obstacles sur le parcours à effectuer ce qui permet de mettre l'élève dans une situation virtuellement dangereuse.

Le domaine médical utilise la RV dans de multiples cadres applicatifs. Nous pouvons distinguer deux types d'usage en EV. Le premier usage est centré sur la formation en EV permettant l'apprentissage, l'entraînement et la préparation d'une opération chirurgicale. Le second usage correspond à l'utilisation des applications thérapeutiques de la RV dans la psychothérapie.

Dans le premier cas, la formation en EV permet de former des étudiants en médecine ou des chirurgiens novices sur des cas différents. En l'occurrence, l'apprentissage s'opère par la répétition des gestes sur un modèle visualisé en EV qui pourront être directement reproduits en situation réelle. Cette formation met l'apprenant dans une position active qui s'avère plus efficace que l'apprentissage par observation



FIGURE 1.3: Simulateur de passerelle de l'école Navale de Brest.

des pairs commun en chirurgie. Par ailleurs, l'erreur est tolérée sur les modèles virtuels d'organes et ne pose pas de risque. La formation en EV permet également aux chirurgiens expérimentés de préparer des opérations délicates, permettant ainsi l'amélioration des compétences techniques des chirurgiens, en diminuant le temps de l'intervention et en augmentant la précision des gestes. Nous citons à titre d'exemple le LAP Mentor Virtual Reality Simulator, un outil de simulation utilisé pour l'entraînement à la chirurgie laparoscopique [NGA⁺13].

Toutefois, afin d'acquérir des gestes précis en EV, les modèles virtuels d'organes utilisés dans la formation doivent reproduire le même comportement naturel que l'organe en question. En effet, certaines parties du corps humain bougent et se déforment au cours du temps à cause de la respiration et par conséquent, la restitution de comportements complexes des corps déformables est nécessaire. Par exemple, dans le cas d'une chirurgie du cancer du poumon en EV, il est nécessaire de restituer les mouvements des poumons afin d'avoir tous les facteurs qui perturbent l'opération chirurgicale. Il est préférable également de refléter la résistance et la réaction des organes avec l'utilisation de retours haptiques. Ces améliorations sensorielles sont nécessaires pour un entraînement efficace par la suite dans le cas des opérations complexes.

Avec le développement technologique, les améliorations visuelles et haptiques sont aujourd'hui possibles et parfois déjà intégrées dans certains simulateurs de RV. Dans la chirurgie, nous citons à titre d'exemple le simulateur développé pour l'entraînement à l'insertion d'une aiguille pour une biopsie rénale Henshall *et al.* [HPE⁺15]. Ce dernier utilise un joystick permettant une insertion précise de l'aiguille qui est branchée à un bras à retour d'effort pour simuler les sensations, comme le montre la figure 1.4. Par ailleurs, dans la médecine dentaire nous citons le simulateur développé par Bogoni et al. [BSP15] dédié à l'entraînement aux instruments d'intervention endodontique qui permet la simulation des gestes pour un traitement utilisant une lime avec retour de force reflétant la force exercée sur la dent.

Dans le deuxième cas, la RV est utilisée dans les pratiques thérapeutiques pour le traitement des phobies. En effet, elle permet l'exposition virtuelle contrôlée des patients aux objets phobiques pour désensibiliser progressivement les sujets aux situations anxieuses. Un tel traitement en EV a été prouvé efficace et a permis de baisser significativement l'anxiété [PR08]. Nous citons à titre d'exemple l'utilisation dans l'acrophobie et l'arachnophobie [CWHW09]. Dans ces cas, un niveau de réalisme élevé n'est pas nécessaire, seul le scénario de traitement est important dans la thérapie.

La RV procure également un environnement d'apprentissage actif pour le domaine éducatif où les



FIGURE 1.4: Simulateur d'insertion d'une aiguille pour une biopsie rénale. Image tirée de [HPE⁺15].

élèves peuvent être immergés dans des expériences éducatives et interagir en temps réel. L'expérience d'apprentissage active en EV aide les élèves à comprendre des phénomènes complexes et favorise la mémorisation des informations acquises. De nombreuses applications ont été développées dans ce domaine comme le simulateur d'apprentissage en métrologie [BBB⁺15]. Le simulateur a pour objectif d'entraîner les mains sur des gestes à réaliser avec différents instruments pour plus d'efficacité lors des classes, comme dans la figure 1.5. Par exemple, prendre une mesure précise avec un instrument spécifique, comme un pied à coulisse, savoir comment interpréter l'échelle de mesure ou déplacer physiquement les instruments à l'emplacement optimal afin de prendre une mesure précise d'une manière efficace.



FIGURE 1.5: Simulateur d'entraînement en métrologie. Image tirée de [BBB⁺15].

En France, le Ministère de l'Éducation Nationale a lancé en 2012 le projet VirtualiTeach afin d'introduire de nouvelles méthodes d'enseignement et d'apprentissage s'appuyant sur les technologies de RV au sein de classes de première, terminale, baccalauréats professionnels et BTS industriels des académies de Rennes, Nantes et Créteil. L'objectif est d'améliorer le contexte d'apprentissage dans les classes de travaux pratiques par l'utilisation de simulateurs, comme le montre la figure 1.6. En effet, les technologies de RV mettent l'élève en situation d'acteur et favorise l'appropriation des connaissances par l'expérimentation en EV [DLE⁺13].

Le domaine industriel fait de plus en plus appel aux technologies de RV, tant pour la conception des produits que dans les chaînes destinées à la fabrication. Un apport important de la RV au sein de ce domaine correspond à la réduction ou la suppression de la fabrication des maquettes physiques dans les processus de conception. En effet, dans l'industrie automobile, la RV est utilisée pour visualiser les prototypes de voitures à l'échelle réelle. Elle offre un substitut économique aux maquettes physiques.



FIGURE 1.6: Simulateur de RV de l'effet Venturi. Image tirée de [DLE⁺13].

L'utilisation de la maquette numérique offre une grande souplesse de modification. En effet, il est possible de la modifier autant de fois que nécessaire jusqu'à obtenir satisfaction de tous les collaborateurs. Par conséquent, éviter la fabrication d'un prototype physique à chaque modification réduit le coût du processus de conception. Le groupe PSA Peugeot Citroën a été convaincu de cet intérêt. Il a intégré la RV pour la



FIGURE 1.7: Exemple d'une séance de travail entre les concepteurs sur le design extérieur d'un modèle de véhicule. La visualisation tridimensionnelle immersive du modèle se fait dans un CAVE avec une projection sur cinq face.

première fois en 1999, pour le marketing de la Citroën Xsara Picasso au travers de l'application : Picasso Virtuelle. Le groupe a ouvert par la suite en 2004 le premier Centre de RV du Groupe installé au coeur de l'ADN, Automotive Design Network de Vélizy. La figure 1.7 montre un exemple de travail collaboratif entre les concepteurs en EV, rendu possible par une visualisation à l'échelle réelle sur des grands écrans immersifs ou dans des CAVEs. Ces outils collaboratifs permettent d'immerger les différents collaborateurs de spécialités diverses dans le modèle virtuel et favorisent la discussion sur les limites et les problèmes de la maquette numérique.

La revue de projet collaborative séduit peu à peu un spectre plus large de professionnels. Notamment, le domaine architectural commence à s'intéresser à cette technologie comme outil de revue de projet. La figure 1.8 illustre un utilisateur immergé dans une chambre d'hôpital afin de discuter des problèmes d'usage.



FIGURE 1.8: Exemple d'une revue de projet architectural dans un CAVE. L'utilisateur teste l'ouverture de la porte des toilettes lorsque la porte d'entrée est ouverte. Image tirée de [DAM⁺07].

Notre travail s'inscrit dans le contexte de la réalisation d'un outil de revue de projet architectural. Dans la suite nous présentons quelques moyens de représentation des maquettes numériques utilisées en architecture et l'intérêt qu'apporte la RV à ce domaine, nous verrons quelques travaux utilisant la RV. Puis, nous donnons un aperçu du processus de revue de projet. Enfin, nous présentons les spécificités du projet CIMBEES.

1.3 L'architecture et la réalité virtuelle

Cette section présente d'abord quelques moyens de représentation des maquettes numériques et explique l'intérêt de la RV dans le domaine architectural. Ensuite, nous différencions les outils de RV en fonction de leurs objectifs d'utilisation. Puis, nous présentons la revue de projet architectural et nous finissons par un aperçu de notre processus de revue de projet dans le cadre du projet CIMBEES.

1.3.1 Les formes de représentation des maquettes numériques

Dans le processus de conception de maisons, les architectes choisissent divers moyens pour représenter leur idées et intentions ainsi que pour évaluer les solutions proposées. Plusieurs modèles de représentation sont nécessaires pour former une image complète du modèle tels que le plan d'intérieur, l'aspect extérieur et l'intégration au terrain et au style des habitations environnantes, en plus de toutes les informations correspondantes : type des cloisons, taille des ouvertures, etc. Habituellement les architectes partent de dessins au trait et croquis en perspective pour arriver à des plans mis à l'échelle et aux maquettes physiques de l'environnement à construire.

Néanmoins, ces moyens classiques sont parfois limités et présentent quelques inconvénients. En effet, le client n'a pas la possibilité d'explorer le modèle et ne possède qu'une seule vue statique. En outre, refaire les maquettes physiques ou les modifier après chaque étape de correction du modèle s'avère une tâche fastidieuse et coûteuse en termes de temps et d'argent.

Avec l'apparition de la Conception Assistée par Ordinateur CAO, les architectes ont fait appel aux représentations tridimensionnelles sur ordinateur comme SketchUp, Autodesk, etc. Ces nouveaux outils de représentation procurent un moyen évolutif qui permet un nombre illimité de modifications. Les architectes peuvent corriger et visualiser facilement les modifications liées aux problèmes rencontrés

lors de la revue de projet [MS06]. Par ailleurs, la visualisation tridimensionnelle sur ordinateur permet le déplacement à l'intérieur du modèle 3D à l'aide de la souris ou d'un clavier.

Les défis environnementaux et de l'industrialisation (nouvelles réglementations et contraintes énergétiques, etc.) sont autant de leviers pour passer de l'usage des plans 2D et 3D classique à l'utilisation de modèles 3D de CAO pour le bâtiment (Building Information Model - BIM) comme Revit, VisualARQ, etc. En effet, ces nouveaux modèles intègrent des informations sémantiques liées aux différentes contraintes à respecter et des données pour les simulations (résistance des matériaux, consommations énergétiques, acoustique, etc.). Ces informations sont adressées lors de la revue de projet pour correspondre à la demande des clients et aux contraintes techniques sur les chantiers lors de la phase de construction.

Néanmoins, un inconvénient important de ces moyens de représentation reste l'échelle. Ni les différents plans 2D sur papier et croquis en perspective mis à l'échelle, ni la visualisation du modèle tridimensionnel sur un écran classique d'ordinateur ne permettent l'évaluation du plan en matière de taille. Grâce à la réalité virtuelle le domaine architectural dispose aujourd'hui d'une nouvelle technologie qui offre une vision 3D avec la profondeur, une immersion dans la maquette 3D et une interaction avec cette dernière. La réalité virtuelle offre plus de réalisme, une interaction intuitive, de l'immersion et une visualisation à l'échelle réelle.

De nos jours, plusieurs projets profitent des bénéfices de la RV dans le processus de conception architecturale pour visualiser à l'échelle 1 : 1 les prototypes en cours de conception. La revue de projet permet de vérifier la cohérence entre les besoins définis au départ et ce qui a été conçu, avant de passer à la phase de réalisation finale. En remplaçant le prototype physique par une visualisation en EV un gain de temps et d'argent considérable est réalisé.

1.3.2 L'usage de la réalité virtuelle

L'utilisation de la RV dans le domaine architectural est récente. Plusieurs projets architecturaux favorisent l'utilisation des outils de RV dans les différentes étapes de la conception, la validation des maquettes numériques et la construction. Dans la conception d'une nouvelle maquette, l'outil de RV permet aux concepteurs de visualiser et d'interagir en collaboration avec des objets virtuels en trois dimensions (blocs de pièces, fenêtre, portes, etc.) dans l'EV. L'objectif de cette utilisation est de réduire le nombre de prototypes nécessaires au développement d'une maquette. Dans la revue de projet, l'outil de RV permet aux architectes et aux clients une immersion et une exploration de l'environnement conçu à l'échelle réelle. Elle permet aux acheteurs de maison de se projeter dans le futur habitat et les rend capable de faire des choix, aidant ainsi à la prise de décisions [DAM⁺07, DRRT07]. Dans la planification du processus de construction, l'outil de RV permet aux constructeurs de comprendre plus facilement le scénario de construction en affichant la progression de la construction dans l'ordre au fil du temps. L'objectif de cette utilisation est d'optimiser les calendriers de construction.

L'outil de RV dans ces différents cas permet une immersion collaborative en EV qui constitue une aide puissante dans l'amélioration du modèle conçu. Elle favorise ainsi la communication et la discussion entre les différents membres du projet compétent dans divers domaines [DAM⁺07].

La conception de maquettes numériques

À l'heure actuelle, la RV est considérée généralement comme un moyen de conception complémentaire aux formats existants de CAO dans la phase de conception. En effet, la nécessité de valider les modifica-

tions de la maquette numérique induites par la revue de projet selon les normes de construction restreint les modifications complexes en EV. Les modifications géométriques à apporter sur la maquette numérique se font sur ordinateur avec les outils de CAO, après la vérification de leur applicabilité [MS06, MCBT04].

Mackie et al. [MCBT04] proposent deux systèmes complémentaires de conception de maison, un outil de CAO et un outil immersif, chacun pour réaliser des tâches différentes. La création du plan 2D se fait avec l'outil de CAO car elle est plus compliquée à faire en EV à l'échelle réelle. L'outil proposé fournit une grille 2D pour faciliter le dimensionnement du plan et le placement précis des murs. Il offre des interactions pour créer le plan 2D initial de la maison comme la création, l'édition et la suppression des murs. Il permet aussi des interactions pour modifier les paramètres des murs tels que la couleur, l'épaisseur et la hauteur, ces différentes informations sont stockées dans un fichier de données. Les plans 2D créés sont ensuite visualisés en 3D, grâce au fichier de données, en EVI pour qu'ils soient explorés avec une vue à la première personne où l'utilisateur a une vision de la scène à travers la caméra qui se déplace dans la scène virtuelle. L'utilisateur peut naviguer au sein de la maison pour voir le plan à l'échelle réelle et détecter les problèmes difficiles à voir en 2D comme la hauteur des murs et la taille des fenêtres. L'EVI offre une interaction à travers un menu utilisateur qui permet à l'utilisateur de changer la couleur et la taille des murs, rajouter, redimensionner et déplacer des fenêtres et des portes, comme le montre la figure 1.9. Cependant, ces modifications se font sous contraintes imposant que, par exemple, la taille des fenêtres et des portes ne dépasse pas la taille du mur. Le fichier de données de départ est mis à jour au fur et à mesure des modifications.

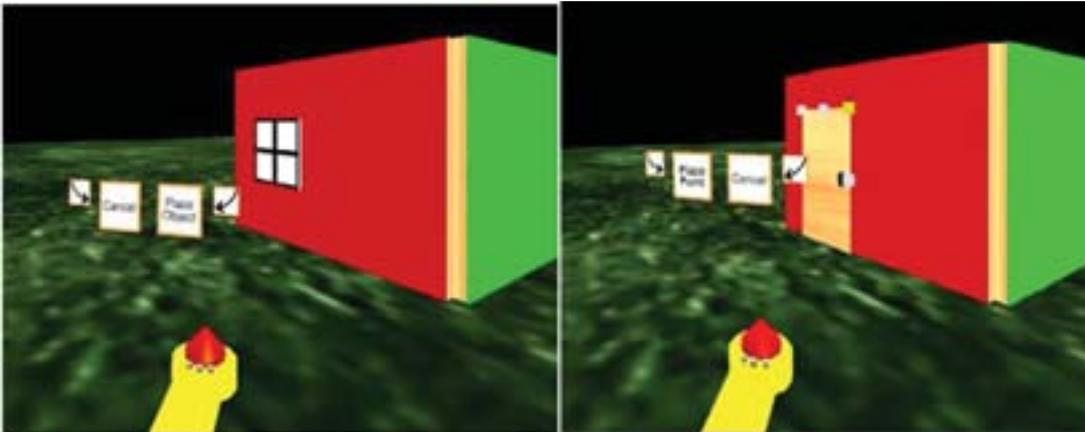


FIGURE 1.9: Exemple d'une conception en environnement virtuel immersif. Dans l'image de gauche l'utilisateur rajoute une fenêtre à la maison. Dans l'image de droite il redimensionne la porte. Image tirée de [MCBT04]

Selon le même concept, Cabral et al. [CVC⁺11] proposent un système de conception architecturale en EVI afin de créer des prototypes simples. L'outil offre la possibilité de créer des maisons par assemblage d'un ensemble de pièces pré-construites. Il permet par la suite d'effectuer des modifications sur les murs, les portes et les fenêtres à l'aide d'un menu. La caractéristique principale de cet outil est la possibilité d'effectuer une simulation d'éclairage. À partir du menu, l'utilisateur peut rajouter un soleil et le déplacer sur une orbite pour simuler l'éclairage du jour. Par ailleurs, en raison de la difficulté de créer des plans à partir de zéro en EVI, cet outil propose 3 modes de visualisation : le mode table où la scène est à une échelle telle que l'utilisateur puisse avoir une vue de haut du modèle tout en restant en EVI, le mode immersif où la visualisation se fait à l'échelle réelle et le mode mixte où l'utilisateur peut faire des

modifications sur le modèle en mode table et les voir en même temps à l'échelle réelle, comme le montre la figure 1.10. Ces trois modes sont visualisés dans un CAVE.



FIGURE 1.10: L'utilisateur modifie la maquette numérique en mode mixte. Image tirée de [CVC⁺11]

La revue de maquettes numériques

Les applications présentées jusqu'à présent permettent la conception des prototypes sans prendre en considération les règles et les normes de construction, par conséquent elles peuvent être uniquement utilisées pour visualiser les idées de départ. Contrairement aux deux travaux précédents, d'autres travaux proposent des outils de revue de projet permettant de visualiser des maquettes numériques déjà réalisées avec des outils de CAO selon les normes de construction, pour les évaluer.



FIGURE 1.11: Exemple de mode de visualisation en EVI. La figure gauche représente une vue en perspective, la figure droite représente une vue balcon. Image tirée de [DRRT07]

De multiples caractéristiques peuvent être revues en EV aidant à la prise de décision au cours du projet. Par conséquent, les outils doivent offrir des interactions diverses selon les besoins et le contexte du projet. Drettakis et al. [DRRT07] proposent dans le cadre de la construction du tramway à Nice un outil de revue de projet en EVI (workbench) dont l'objectif est de voir à plusieurs utilisateurs finaux la place publique "Garibaldi" après l'intégration du tramway. L'outil offre une géométrie et des textures de bâtiments de haut niveau, un éclairage avec les ombres et un haut niveau de réalisme audiovisuel. En outre, il permet la simulation de la foule et du trafic de véhicules. L'interaction se fait avec un menu, l'utilisateur peut insérer des objets et les modifier, par exemple, il peut rajouter des bancs en pierre, des parasols et des

arbres, les déplacer, les tourner, etc. L'outil propose trois modes de visualisation : vue de haut, vue en perspective et vue balcon, comme le montre la figure 1.11.

Dans le cadre de la conception des chambres d'un hôpital, Dunston, et al. [DAM⁺07] proposent un outil de revue de projet avec un bon niveau de réalisme, dans un CAVE avec trois murs et le sol comme dispositif d'affichage. L'outil offre une simulation du son comme le bruit dans les couloirs à l'extérieur de la chambre, rejoué à partir d'un son pré-enregistré, ou des sons localisés dans la pièce comme le bruit d'une horloge murale. Ainsi, lorsque l'utilisateur ouvre la porte de la chambre ou s'approche de l'horloge murale le son augmente et inversement. Par ailleurs, pour évaluer l'espace de la pièce, l'utilisateur peut sélectionner et déplacer des objets afin de vérifier s'il y a assez d'espace pour réaménager la pièce, comme illustré dans la figure 1.12. Pour redimensionner la chambre, l'utilisateur, au lieu de modifier manuellement la taille, choisit entre deux variantes proposées : une chambre de taille standard et une chambre de grande taille. Il peut aussi choisir l'environnement extérieur visible à travers la fenêtre parmi deux variantes : environnements urbain ou non, comme il peut modifier l'étage de la chambre entre rez-de-chaussée ou chambre à l'étage.



FIGURE 1.12: L'utilisateur déplace la table près du lit pour évaluer l'espace de la pièce. Image tirée de [DAM⁺07].

L'utilisation des outils de revue de projet en EV est applicable pour tout type de construction, comme par exemple la revue de projet pour la construction de salles d'audience [MMP06, MS06], comme illustré dans la figure 1.13. Majumdar et al. [MS06] proposent un outil de revue permettant la visualisation d'une salle d'audience dans un CAVE. L'utilisateur peut réaménager la salle, déplacer des objets comme les tables ou changer la couleur des objets.

La planification de la construction

Les outils de RV sont utilisés aussi dans la phase de construction pour voir le calendrier de construction et sa progression. En l'occurrence, la maquette numérique est visualisée en EV avec la possibilité de voir le scénario de progression au fil du temps. Ce modèle 3D visualisé avec la dimension supplémentaire de temps est appelé le modèle 4D. Cette utilisation de la RV dans l'architecture représente un avantage supplémentaire. En effet, revoir la planification de la construction d'un modèle en EV permet de détecter les défaillances du calendrier et par conséquent, les corriger.



FIGURE 1.13: Session de revue de projet avec les juges dans un CAVE. Image tirée de [MS06].

Yerrapathruni et al. [YMBH05] ont exploité l'outil de RV pour élaborer un plan optimal de construction. Dans le cadre de la planification de la construction d'une salle dans une centrale nucléaire, des experts de l'industrie réalisent des planifications du processus de construction. Les calendriers avec la progression de la construction sont par la suite revus en EVI où les experts revoient étape par étape la construction et évaluent sa performance, tout en discutant de la stratégie de la construction, comme le montre la figure 1.14. Le résultat de ce travail a révélé un gain de temps sur le calendrier établi de l'ordre de 28%. La revue du modèle 4D permet de développer une compréhension plus détaillée des dépendances du calendrier, d'identifier plus de problèmes de constructibilité (par exemple les emplacements de soudures) et d'améliorer le calendrier général.



FIGURE 1.14: Visualisation du modèle 4D d'une salle d'une centrale nucléaire en environnement virtuel immersif. Image tirée de [YMBH05]

L'objectif des différents travaux présentés est de proposer des outils de RV utilisables dans le processus de conception architectural partant de la conception de prototypes pour la représentation des idées de départ, à la revue de projet et de l'avancement de la construction. La revue de projet constitue une étape importante pour la vérification de la maquette numérique en fonction des besoins et des objectifs fixés. Nous présentons, à présent, la revue de projet dans le processus de conception et puis en particulier la

revue de projet CIMBEES.

1.3.3 La revue de projet architectural

D'après [CSC89], le processus de conception architecturale est considéré comme un problème difficile à structurer qui peut être divisé en trois phases 1) la génération de solutions partielles, 2) l'évaluation des solutions proposées (partielle et complète) et 3) le patching ou correction des incompatibilités dans les solutions [CSC89]. Les deux dernières phases sont présentes lors de la revue de projet, ce sont des étapes répétitives itérées jusqu'à satisfaction du client et des différents participants au projet.

Une autre décomposition du processus de conception est celle de Wojtowicz et al. [WM92] basée elle aussi sur trois étapes : 1) la génération des idées de conception, 2) la représentation, la documentation et la simulation de ces idées, 3) la communication des idées et la critique et le raffinement des modèles. À la différence de la première décomposition, ici la phase de revue de projet vient uniquement dans la dernière étape. Toutefois le principe de conception reste globalement le même : étude des besoins, solutions puis évaluation et corrections.

La revue de projet est collaborative impliquant la présence de plusieurs personnes de divers domaines : les architectes, les clients, les corps de métiers impliqués dans la construction du bâtiment et les partenaires du projet, comme le montre la figure 1.15. Elle est consacrée à la vérification du respect des engagements pris dans le cadre du contrat, elle a pour objectif de s'assurer de la satisfaction du client et d'examiner les conditions de réalisation des objectifs et ainsi déceler les freins et difficultés de construction. À l'issue de la revue, les participants proposent des solutions éventuelles pour résoudre les difficultés et les problèmes rencontrés et prennent des décisions concernant les points abordés.



FIGURE 1.15: Plusieurs participants sont immergés ensemble pour une revue de projet collaborative. Image tirée de [MMP06].

La revue de projet dans le processus de conception peut se faire à plusieurs moments du projet : tout au début, pour s'assurer des besoins du client ou des partenaires du projet, au cours de la conception pour vérifier les contraintes techniques telles que l'installation du réseau électrique dans la maison ou la canalisation. Par conséquent, la maquette numérique évolue avec le temps, après chaque revue de projet en cas de modification, et à chaque niveau du projet en rajoutant plus de détails selon l'avancement du projet. L'objectif de cette phase dépend des acteurs participant à la revue. La revue de projet peut être entre le client et l'architecte, dans ce cas, l'objectif est de discuter du plan intérieur de la maison : taille des pièces, agencement, choix des matériaux et budget. Elle peut être également avec des ouvriers et dans ce cas l'objectif est de discuter des problèmes de construction.

La revue de projet dans le cadre CIMBEES

Notre travail s'inscrit dans le cadre du projet CIMBEES, l'objectif de ce projet est de construire des maisons ergonomiques, évolutives et écologiques qui peuvent être dédiées aux primo-accédants et aux personnes âgées. Ce projet s'intéresse à l'intégration des outils de RV dans le processus de conception notamment, pour faire des visites virtuelles de maison à l'échelle réelle. L'objectif est de revoir la maquette numérique avec les clients et d'évaluer le plan de la maison selon leurs besoins et leurs attentes et en conséquence, prendre des décisions.

La phase de revue de projet CIMBEES passe par plusieurs étapes comme le résume la figure 1.16 en suivant la décomposition de Coyne et al. [CSC89]. Après l'étape de visualisation de la maquette numérique 3D fournie par les architectes dans l'environnement virtuel immersif, les architectes planifient une visite virtuelle avec le client pour revoir la maquette numérique à l'échelle réelle. Lors de la visite, ils abordent les points fixés avant la revue qui concernent la validation : 1) des choix esthétiques comme la configuration du plan (surface, nombre de pièce et agencement) et le style de maison (style intérieur), 2) des prestations induites : accessibilité et confort d'usage. À l'issue de la visite, il est possible soit de valider le modèle sans faire de modification, dans ce cas le processus se termine, soit d'apporter des modifications. Néanmoins, les architectes doivent alors revoir la mise-à-jour du modèle pour vérifier sa conformité aux normes de construction. Après cette validation une nouvelle visite est planifiée pour une ré-évaluation par les clients.

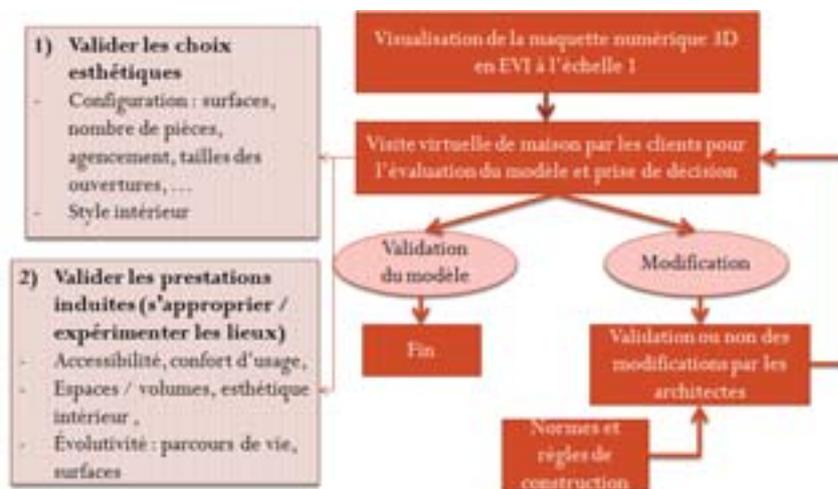


FIGURE 1.16: Schéma résumant le processus de revue de projet CIMBEES.

En fonction des objectifs de cette revue de projet, nous avons défini les interactions et les fonctionnalités de notre outil de revue de projet que nous présentons dans le chapitre 3.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, après une introduction à la RV, dans un premier temps, nous avons présenté quelques exemples d'application de la RV dans plusieurs domaines : l'armée, la médecine, l'industrie, l'éducation et l'architecture. Selon les applications présentées, les outils de RV sont utilisés dans des cadres applicatifs divers qui se résument à la simulation, la formation, les soins thérapeutiques et la revue de projet.

Dans un deuxième temps nous nous sommes intéressés particulièrement au domaine architectural dans lequel se situe notre travail. En l'occurrence, trois cas d'utilisation des outils de RV sont présentés : 1) la conception de maquettes numériques, 2) la revue de maquettes numériques et 3) la planification de la construction. Ceci permet aux outils de RV d'être exploités tout au long du processus de construction : 1) dans la phase de conception pour créer les prototypes de départ, 2) dans la revue de projet pour évaluer la maquette numérique et 3) dans la phase de construction pour évaluer la planification et le calendrier de construction.

Ces outils de RV offrent ainsi plusieurs services qui sont présents ou non selon les besoins du projet architectural et le cas d'utilisation. Dans ce cadre architectural nous résumons, ci-dessous, la plupart des services que nous avons trouvés dans les travaux présentés :

- La modification des aspects visuels comme les couleurs des murs ou des objets.
- La modification sous contraintes (i.e. taille d'une fenêtre ne dépasse pas la taille d'un mur) ou selon un choix prédéfini proposé dans un menu.
- L'insertion d'objet dans la scène à partir d'un menu.
- Création de nouvelles pièces par assemblage de modules (blocs de pièce prédéfini).
- Simulation de l'éclairage pour vérifier la luminosité des pièces à plusieurs moments de la journée.
- Déplacement des objets existants pour mieux comprendre la taille des pièces.
- Visualisation de plusieurs variantes de maisons ou de pièces.

Les outils de RV, selon la définition de cette dernière, se caractérisent par une immersion collaborative dans le monde virtuel avec une interaction en temps réel. En outre, la visualisation du monde virtuel est souvent à l'échelle réelle. Cette caractéristique est utilisée notamment pour la revue de projet architectural. Nous avons présenté cette dernière de manière générale car elle constitue le cadre applicatif de notre travail, puis de manière particulière dans le cadre du projet CIMBEES.

La revue de projet architectural en EV permet une économie substantielle durant la phase de conception en réduisant le coût et le temps de la revue et la prise de décision. La validation de la maquette numérique est basée principalement sur l'évaluation des tailles et des distances. Par conséquent, l'efficacité des décisions prises dépend de la capacité des utilisateurs à se faire un jugement sur ce qu'ils voient dans l'EV sans biais par rapport à l'environnement réel correspondant. Le chapitre suivant est consacré à l'étude de la perception des distances en environnement réel et virtuel.

Chapitre 2

La perception des distances en environnement virtuel

Sommaire

2.1	Contexte théorique	36
2.1.1	Le principe de la perception	37
2.1.2	La perception visuelle de la profondeur	38
2.1.3	La problématique de la perception des distances dans les environnements virtuel et réel	39
2.2	Les facteurs affectant la perception des distances	40
2.2.1	Facteurs techniques	40
2.2.2	Facteurs compositionnels	49
2.2.3	Facteurs humains	60
2.3	Les améliorations de la perception des distances en environnement virtuel	61
2.3.1	La correction des estimations	61
2.3.2	Les avatars	62
2.3.3	Le champ de vision	65
2.4	Facteurs identifiés et retenus pour nos expérimentations	70
2.4.1	Facteurs de l'expérimentation I	70
2.4.2	Facteur de l'expérimentation II	71
2.4.3	Facteurs de l'expérimentation III	71
2.5	Conclusion	71

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la perception des distances en EV qui constitue une base pour la prise de décisions dans la revue de projet reste difficile à appréhender. Les distances sont parfois sous ou surestimées en EV comparativement à l'environnement réel. En effet, la perception dans le monde réel s'appuie sur des indices fournis soit par le système visuel soit par l'environnement qui nous entoure. Lorsque nous passons en EV, ce dernier altère les indices de perception et conduit à des différences.

Plusieurs facteurs influencent la perception des distances en EV, ils sont très variés et difficiles à bien identifier et isoler. En effet, ces facteurs ont été le sujet de nombreuses expérimentations. Toutefois, les études expérimentales varient sur plusieurs éléments comme le dispositif d'affichage, la scène virtuelle,

l'utilisation de la stéréoscopie, etc. Par conséquent, les résultats obtenus ne peuvent pas être généralisés ni confirmés pour d'autres configurations expérimentales.

Dans ce chapitre, notre objectif est de présenter la majorité de ces facteurs pour démontrer leur multiplicité, de souligner les différences entre les études expérimentales et les résultats qui en découlent, tout en essayant d'apporter une analyse sur les différences et sur les similarités des différents résultats. En raison de la multiplicité des facteurs, dans cet état de l'art nous ne faisons pas la différence entre les travaux concernant les distances égocentriques (entre l'utilisateur et l'objet) et les distances exocentriques (entre deux objets). En outre, dans le contexte de revue de projet, il est difficile de différencier ces deux types de distance. En effet, évaluer l'habitabilité qui représente le confort de vie dans une pièce peut être effectué de plusieurs manières. Par exemple, l'utilisateur peut estimer la surface de la pièce soit en se basant sur la largeur et la profondeur et dans ce cas, il estime des distances exocentriques pour évaluer le confort de vie ou estimer la taille de l'espace qui l'entoure soit en estimant la distance entre lui et les différents murs et dans ce cas, il estime des distances égocentriques.

La revue de l'état de l'art proposée par Renner *et al.* [RVH13] synthétise un large éventail des facteurs et des travaux précédents. Dans cet état de l'art, les auteurs regroupent ces facteurs en quatre catégories : les facteurs techniques, les facteurs compositionnels, les facteurs humains et les méthodes d'estimation des distances. Cette catégorisation sépare les facteurs selon leur liaison au 1) matériel physique, 2) à l'EV (scène virtuelle et interaction), 3) à l'être humain ou à 4) à la méthode de restitution de la distance, ce qui nous semble pertinent. Pour cette raison, dans le reste du chapitre, nous présentons les différentes expérimentations des travaux précédents en fonction des facteurs étudiés en adoptant la catégorisation de Renner *et al.* [RVH13]. Par ailleurs, nous apportons quelques modifications à cette catégorisation auquel cas nous soulignons et justifions cette différence. Nous ajoutons également quelques nouvelles références. Les méthodes d'estimation des distances sont présentées dans le chapitre 4.

La plupart de ces facteurs ont été identifiés à partir du principe de la perception des distances du système visuel. Dans ce chapitre nous expliquons d'abord le principe de la vision humaine ainsi que les principaux indices utilisés pour la perception des distances. Ensuite, nous décrivons la problématique de la perception des distances dans les environnements virtuel et réel, car elle semble différente entre les deux environnements. Puis, nous proposons un état de l'art des différents travaux portant sur l'effet des différents facteurs sur la perception des distances en environnement virtuel et réel. Enfin, nous abordons quelques solutions suggérées pour améliorer la perception des distances en EV.

2.1 Contexte théorique

En raison de la complexité de la vision humaine, concevoir une interface visuelle de qualité est une tâche plus délicate qu'il n'y paraît. Par conséquent, il est indispensable d'avoir une vision claire du fonctionnement du système visuel. Nous nous intéressons ici au principe de fonctionnement du système visuel humain et aux indices utilisés pour la perception. Connaître ces indices de perception est nécessaire pour expliquer la différence dans l'estimation des distances trouvée entre les deux environnements virtuel et réel.

2.1.1 Le principe de la perception

Le système visuel humain est constitué d'un ensemble d'organes travaillant ensemble pour la perception visuelle. L'image extérieure est capturée à l'aide des deux récepteurs sensoriels, les yeux. Ces derniers sont presque en mouvement continu pour percevoir l'environnement et fournir des informations sur ce qui nous entoure. L'œil se compose de différents éléments aidant à l'acquisition de l'image : la cornée, le cristallin et la rétine, comme illustré dans la figure 2.1. La cornée constitue la lentille principale du système optique, le cristallin correspond aussi à une lentille mais biconvexe. La lumière extérieure passe à travers ces deux lentilles optiques pour se projeter sur la partie arrière de l'œil, la rétine. Cette dernière capte l'image au fond de l'œil à la manière d'un écran. Les deux images sont transmises par la suite à travers le nerf optique au cerveau pour qu'elles soient traitées comme une seule image. Pour que les deux yeux aient la même image, ils font converger leur axe visuel vers un point unique de fixation pour une fusion binoculaire. L'axe visuel passe par la pupille, le trou situé au milieu de l'iris.

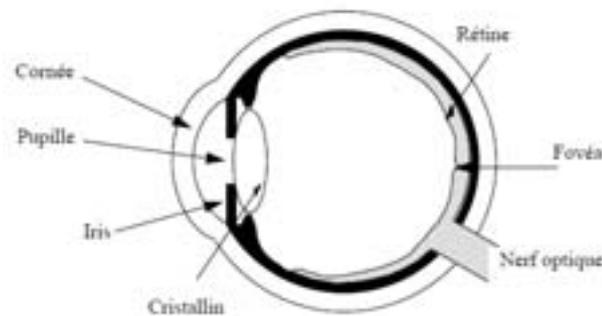


FIGURE 2.1: Composition anatomique de l'œil humain. Image tirée du traité de la réalité virtuelle [FMA⁺06].

Les caractéristiques du système visuel humain

Les deux yeux sont séparés d'une distance appelée la distance interoculaire, cette distance est généralement comprise entre 50 et 70 mm pour la plupart des adultes, avec une moyenne de 63mm [Dod04].

Le système visuel est caractérisé par le champ de vision qui représente l'angle perçu par chaque œil et par les deux yeux ensemble, nous parlons dans ce cas de la vision binoculaire. L'œil a un champ de vision horizontal et vertical de 150° et 135° respectivement, que nous notons ($150^\circ \times 135^\circ$). Les champs de vision des deux yeux se recouvrent partiellement sur une large zone de 120° qui constitue la vision binoculaire dans laquelle se situe le point de fixation où convergent les axes visuels. La vision humaine permet une perception avec un champ de vision global horizontal de ($200^\circ \times 135^\circ$).

Le phénomène de convergence se produit lorsque les deux yeux sont orientés et fixés sur le point de l'espace observé. Dans ce cas les deux axes visuels observe la même cible.

L'accommodation est assurée par le cristallin, ce dernier étant un organe déformable qui se modifie par l'action de muscles en fonction de la position, plus ou moins éloignée, de l'objet à observer. Ainsi, il permet de mettre au point sur la rétine pour voir des objets proches ou éloignés avec une image nette. L'accommodation est l'action de la mise au point.

2.1.2 La perception visuelle de la profondeur

Le système visuel humain s'appuie sur plusieurs indices visuels pour extraire les informations de profondeur, distances et position des objets. Ainsi, un traitement cognitif se fait grâce à l'expérience apprise dès le plus jeune âge en utilisant ces indices pour interpréter les informations de profondeur et de position des objets. Ces indices sont regroupés sous deux catégories [FMA⁺06] :

- les indices proprioceptifs : l'accommodation et la convergence. Ces indices proviennent des actions des muscles orbitaux et ciliaires.
- les indices visuels : monoculaire et binoculaire. Ces indices proviennent soit d'un seul œil soit des deux ensemble.

1) Les indices proprioceptifs

Les indices proprioceptifs sont liés à la vision binoculaire. Ils sont fiables à faible distance (jusqu'à 2 mètres) [Gog61]. Dans le cas de la convergence, l'information sur la profondeur est extraite à partir des deux images légèrement différentes d'un seul objet projeté sur les deux yeux. De même, le principe de l'accommodation fournit une image nette sur l'objet fixé et légèrement floue sur les autres parties de l'espace visuel. Lorsque deux projections sont combinées, l'être humain exécute un processus de convergence-accommodation et utilise la disparité pour en déduire la représentation 3D de la scène observée. La disparité binoculaire est la différence de position du même objet sur les images projetées sur la rétine de chaque œil.

2) Les indices visuels

Les indices visuels sont liés à l'information fournie par l'image projetée sur la rétine, obtenue avec la vision monoculaire et binoculaire. Les indices visuels se catégorisent en :

- *Les tailles relatives* : nous avons appris naturellement que la taille des objets décroît avec la distance. En connaissant les tailles des objets il est possible de comparer leur taille perçue pour en déduire la distance relative.
- *L'occlusion* : naturellement lorsqu'une partie d'un objet est cachée partiellement par un autre, celui-ci est placé devant lui. Par un raisonnement cognitif, le cerveau considère que ces deux objets sont placés à une profondeur différente et non comme deux parties adjacentes d'un même objet placées sur le même plan. Cette interprétation permet d'obtenir une information sur la profondeur relative.
- *La lumière et les ombres* : les variations de lumière et les ombres améliorent la perception de la forme avec l'augmentation du relief.
- *Gradient de texture* : lorsque la texture d'un objet est perçue plus nettement, ce dernier est considéré placé à une faible profondeur.
- *Variation de visibilité dans une scène extérieure* : en extérieur, la visibilité diminue avec la distance. En effet la transparence de la couche atmosphérique, appelée épaisseur optique, rend les objets lointains, à une grande distance (i.e. au-delà de 100 m) moins visible ce qui fournit les informations de profondeur.
- *La perspective* : elle correspond à la représentation en relief des objets sur une surface ou un écran. Cette illusion de 3 dimensions fournit les informations de profondeur.

- *La parallaxe de mouvement* : lorsqu'un observateur fixe son regard sur un point, puis bouge sa tête vers une autre direction ou avance vers le point fixé, cela se traduit par un mouvement apparent des objets situés au delà du point de fixation. En effet, les objets entre l'observateur et le point de fixation semblent se déplacer dans le sens inverse à l'observateur. Grâce à la parallaxe de mouvement il est facile de se faire un jugement de la profondeur relative lorsqu'un observateur est en mouvement.

La distance entre les deux yeux entraîne une différence entre l'image projetée sur l'œil gauche et l'image projetée sur l'œil droit. Le décalage horizontal entre les deux images rétiniennes d'un même objet définit la disparité binoculaire qui donne l'effet de profondeur. Cet indice est pertinent pour des distances dans l'espace personnel (jusqu'à 2m). L'information de profondeur fournie par ce phénomène s'atténue linéairement avec l'augmentation de la distance par rapport à l'observateur.

2.1.3 La problématique de la perception des distances dans les environnements virtuel et réel

La perception des distances est un phénomène complexe qui prend en compte de nombreux facteurs. Les associations entre ces divers facteurs permettent à l'homme d'avoir une appréciation relativement précise de l'univers spatial qui l'entoure. Toutefois, l'être humain est souvent incapable de donner une estimation précise de la distance. Par ailleurs, en EV la perception des distances semble se dégrader davantage qu'en environnement réel. Toutefois, cette dégradation n'est pas systématique. En effet, de multiples travaux ont étudié et comparé la tâche d'estimation des distances dans les deux environnements. Les résultats obtenus sont variés entre les différentes études. Dans certains travaux, les distances sont précises en environnement réel tandis qu'elles sont sous estimées en EV [PdIRK⁺13, ATdIR⁺10]. Dans d'autres travaux, les distances sont sous estimées dans les deux environnements virtuel et réel [KSS⁺09, GNP⁺10, PKCR05] ou même précise en EV [RBS09].

Ces nombreuses études se sont intéressées à la compréhension du problème de la perception des distances et à la définition de ses origines dans le but d'améliorer la perception des distances en EV. Ces études expérimentales ont essayé de contrôler et d'isoler certains facteurs de la perception de profondeur. Cependant, la grande variabilité entre les expérimentations, que ce soit au niveau du matériel ou au niveau de la configuration, constitue un frein pour la généralisation des résultats obtenus.

Malgré l'essor des technologies de RV et les efforts pour procurer des EVs réalistes, ces derniers restent encore différents. En effet, dans l'espace physique l'homme est en mesure d'utiliser la vue, l'ouïe, le toucher et l'odeur pour créer une perception de l'espace dans son esprit (une carte mentale) et avoir une impression sur l'environnement dans lequel il se trouve. Dans le monde numérique chacun de ces sens est affecté différemment. Par exemple, le champ de vision offert par les dispositifs d'affichage comme les HMDs est plus restreint que le champ de vision humain. Pareillement, les retours de toucher fournis par les bras haptiques ne permet pas de reproduire tous les types de surface. Cette dissemblance peut être à l'origine de l'altération de la perception des distances.

Dans ce qui suit nous allons revoir certains travaux examinant la perception des distances et nous proposerons une vue globale des différents facteurs abordés. Nous présentons les configurations expérimentales et les différents facteurs étudiés ainsi que les résultats obtenus.

2.2 Les facteurs affectant la perception des distances

Comprendre la provenance des problèmes d'estimation des distances reste une tâche délicate. En effet, isoler les facteurs influant la perception des distances est difficile car, d'une part, plusieurs facteurs sont impliqués dans la perception des distances, d'autre part, les expérimentations examinant ces facteurs sont très variables entre elles (différents dispositifs d'affichage, stimuli visuels, intervalle des distances à estimer, etc.). Toutefois, de nombreux travaux ont essayé d'identifier ces différents facteurs. Selon Renner *et al.* [RVH13] nous pouvons distinguer quatre catégories de facteurs : les facteurs techniques, les facteurs compositionnels, les facteurs humains et les méthodes d'estimation des distances, comme illustré dans la figure 2.2. Les facteurs techniques ont été définis par Renner *et al.* comme les technologies de RV utilisées, à savoir les dispositifs d'affichage et les différents paramètres qui y sont associés comme le champ de vision, le type du dispositif d'affichage, la stéréoscopie, etc. Les facteurs compositionnels ont été définis comme les caractéristiques de l'EV, c'est à dire les stimuli visuels, la qualité du rendu, etc. Les facteurs humains ont été définis comme les caractéristiques psychologiques et la différence entre les individus comme l'âge et le sexe. Les méthodes d'estimation des distances représentent les méthodes utilisées pour évaluer la distance perçue comme les méthodes d'estimation directe avec une métrique comme le mètre ou la méthode de la marche directe ou indirecte, etc. que nous détaillons plus loin dans le chapitre 4.

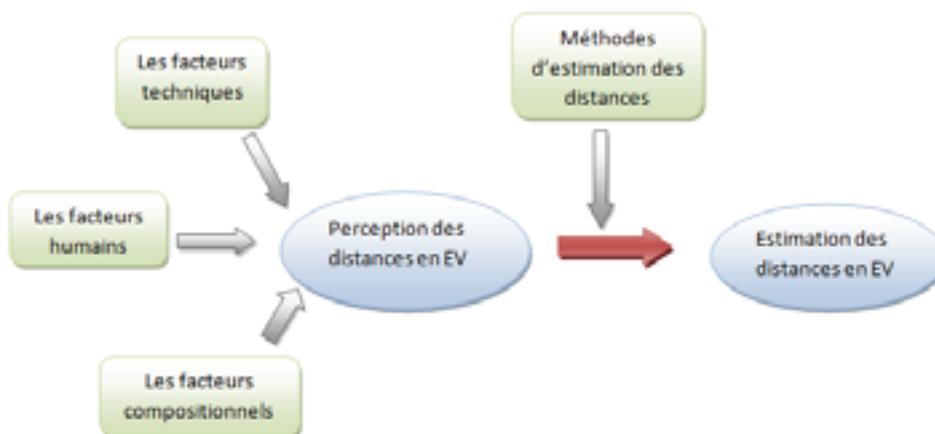


FIGURE 2.2: Les différentes catégories de facteurs influant la perception des distances en EV, image tirée est traduite en français de [RVH13].

2.2.1 Facteurs techniques

Dans la RV, la scène virtuelle est perçue à travers les dispositifs d'affichage alors qu'en environnement réel la perception se fait sans intermédiaire. L'utilisation des technologies de RV induit une différence dans la perception des distances entre les deux environnements réel et virtuel et entre les dispositifs d'affichage eux-mêmes. En effet, les dispositifs d'affichage sont différents les uns des autres. Par exemple, les CAVEs offrent généralement un champ de vision large tandis que les HMDs offrent un champ de vision restreint. Par ailleurs, dans les EVs, les indices de profondeur (la stéréoscopie, la parallaxe, etc.) utilisés dans la perception humaine sont différents ou parfois ne sont pas fournis, ce qui peut influencer la perception des distances en EV.

Dans l'état de l'art proposé par Renner *et al.* [RVH13] les facteurs techniques regroupent 1) *le matériel*

notamment le champ de vision et le poids des HMDs, 2) *la disponibilité des indices proprioceptifs de profondeur* regroupant l'accommodation et la convergence, la parallaxe et la stéréoscopie, 3) *la qualité graphique* traitant principalement la qualité du rendu photo-réaliste et l'utilisation des textures, 4) *la distorsion géométrique* liée au champ de vision géométrique, l'angle de déclinaison, la hauteur de la caméra, la distance interoculaire.

Comme nous pouvons le remarquer les facteurs techniques sont très nombreux, dans cette sous section nous en présentons quelques uns de manière différente de Renner *et al.* Nous divisons les facteurs techniques principalement en deux sous catégories : les facteurs liés aux caractéristiques des dispositifs d'affichage et les facteurs liés à la configuration de ces derniers.

Sous les caractéristiques des dispositifs d'affichage nous présentons les travaux sur les paramètres physique offerts par les dispositifs d'affichage. Nous détaillons les facteurs traités sous le facteur *matériel* dans la revue de Renner *et al.* à savoir le champ de vision physique et le poids des HMDs. Par ailleurs, nous rajoutons la visibilité du corps humain et du sol qui ont été traitées par Renner *et al.* dans les facteurs compositionnel sous *les avatars*. Nous apportons cette modification car nous trouvons que la possibilité de voir le corps physique humain en EV et la visibilité du sol sont liées aux caractéristiques des dispositifs d'affichage. En effet, les HMDs ne permettent pas de voir le corps humain en EV. En outre, les écrans sans la projection sur le sol ne permettent pas de voir le sol proche qui entoure l'utilisateur en EV.

Sous la configuration technologique nous présentons les travaux concernant la disponibilité de certains paramètres de projection 1) La stéréoscopie et la parallaxe, 2) l'accommodation et la convergence, 3) la vision mono/binoculaire.

Les caractéristiques des dispositifs d'affichage

Les dispositifs d'affichage représentent la base d'une application de RV pour visualiser les scènes virtuelles. Les HMDs, les CAVEs et les grands écrans immersifs sont des intermédiaires entre le monde réel et virtuel. Chacun de ces dispositifs d'affichage a des propriétés physiques et des caractéristiques différentes : le niveau d'immersion, le champ de vision, le poids, etc. Par exemple, le HMD est un dispositif d'affichage sous forme d'un casque que l'utilisateur porte pour voir la scène virtuelle à travers un petit écran en face des yeux. Ce dispositif d'affichage est totalement immersif car il coupe l'utilisateur du monde extérieur. Cependant, il se caractérise par son champ de vision restreint et par son poids jugé un peu lourd et dérangent. Par ailleurs, les murs immersifs n'ont pas ce problème de poids, toutefois l'utilisateur n'est pas totalement immergé car à tout moment il peut voir l'environnement réel, juste en tournant sa tête de l'écran. Plusieurs travaux ont réalisé des comparaisons entre les différents paramètres des dispositifs d'affichage pour voir leur influence sur la perception des distances.

1) Le champ de vision et la taille des écrans : les propriétés physiques des HMDs telles que le champ de vision limité et la taille du dispositif semblent avoir des effets négatifs sur la performance en EV. Dans une étude comparative, Grechkin *et al.* [GNP⁺10] comparent la perception des distances égocentriques avec deux dispositifs d'affichage : le HMD et le grand écran immersif LSID. Dans cette étude, le HMD offre un champ de vision de $49.5^\circ \times 40.5^\circ$ et le LSID offre un champ de vision de $224^\circ \times 46^\circ$. Malgré la différence dans le champ de vision, les sujets ont donné une sous estimation similaire avec les deux dispositifs. Cependant, il est à noter qu'à la différence de l'affichage avec le HMD, l'affichage avec le LSID est sans la stéréoscopie et la parallaxe.

Dans une autre expérimentation, Alexandrova *et al.* [ATdIR⁺10] ont comparé la perception des

distances en environnement réel et en EV en utilisant un grand écran immersif semi-sphérique ($220^\circ \times 165^\circ$) offrant une vision stéréoscopique. Les participants jugent 8 distances de 2 à 5.5m. Les distances sont sous estimées en EV et presque précises en environnement réel.

Les résultats obtenus dans ces travaux montrent qu'un large champ de vision horizontal ne conduit pas systématiquement à des estimations précises.



FIGURE 2.3: Exemple des écrans : écrans sphérique, grand écran plat immersif et cabine de simulation (de gauche à droite). Image tirée de [PdIRK⁺13].

Les écrans immersifs varient aussi entre eux, Piryankova *et al.* [PdIRK⁺13] ont comparé trois types d'écrans, sans affichage stéréoscopique ni parallaxe de mouvement : un écran semi sphérique, une cabine de simulation et un LSID, comme le montre la figure 2.3. Les distances entre 1.5 et 6m sont sous estimées dans les trois conditions. Les distances sont moins sous estimées avec l'écran sphérique. En outre, elles sont moins sous estimées avec le LSID en comparant à la cabine de simulation. La différence de précision entre l'écran sphérique et les deux autres peut être liée au champ de vision restreint pour ces deux derniers. En effet, l'écran sphérique a un champ de vision horizontal de 220° et vertical de 165° tandis que le LSID a un champ de vision horizontal de 105° et vertical de 88° et la cabine de simulation a un champ de vision horizontal de 140° et vertical de 70° .

Les dispositifs d'affichage, selon leur niveau d'immersion, offrent ou non la vision périphérique. L'absence de cette vision semble influencer l'estimation des distances. Klein *et al.* [KSS⁺09] ont comparé la perception des distances dans trois environnements : environnement réel, EV visualisé dans un CAVE, et EV visualisé sur un mur carrelé. Les distances sont sous estimées davantage avec ce dernier à cause de l'absence de vision périphérique. En effet, dans l'environnement réel et l'EV visualisé dans le CAVE, l'utilisateur est entouré par l'environnement ce qui lui fournit plus d'information sur la scène tandis qu'avec le mur carrelé, la scène virtuelle est affichée uniquement sur l'écran face à l'utilisateur. L'absence de l'information fournie par la vision périphérique influence la perception des distances. Par ailleurs, avec le mur carrelé, l'utilisateur est en semi-immersion, s'il se tourne, il voit la salle dans laquelle se déroule l'expérimentation.

Dans une autre étude, Riecke *et al.* [RBS09] ont étudié l'influence du type du dispositif d'affichage sur la perception des distances, en fixant le champ de vision à $32^\circ \times 24^\circ$. Ils ont comparé le HMD et deux écrans de 24" et 50". Le sujet voit une cible puis il estime la distance avec la technique de la marche aveugle triangulée (voir le chapitre 4). Les estimations sont assez précises dans toutes les conditions. Ce résultat est contradictoire avec l'idée que le champ de vision restreint dégrade la perception de distance. Cette précision peut probablement être liée à l'utilisation d'une scène virtuelle réaliste dans l'expérimentation que nous discuterons dans la section suivante.

Les travaux cités précédemment sont consacrés à l'influence du champ de vision horizontal sur



FIGURE 2.4: Un participant observant la scène virtuelle à travers le mur carrelé. Image tirée de [KSS⁺09].

la perception des distances. Peu de travaux ont examiné l'influence du champ de vision vertical. Wu *et al.* [WOH04] dans leur expérimentation ont examiné l'effet des deux sur l'estimation des distances en environnement réel. Les sujets portent des lunettes avec une ouverture rectangulaire permettant de restreindre le champ de vision. Dans la première condition le champ de vision vertical est fixé à 50.9° tandis que le champ de vision horizontal varie entre 29.2° , 21.5° et 14.3° . Inversement dans la deuxième condition, le champ de vision vertical est variable (39.9° , 29.6° , 21.1° et 13.6°) tandis que le champ de vision horizontal est fixé à 57.7° . Dans les deux conditions, les estimations sont précises à l'exception des champs de vision vertical : 21.1° et 13.6° dans la deuxième condition. Ce résultat montre que le champ de vision vertical influence aussi la perception des distances.

C'est pourquoi dans notre travail, nous nous sommes intéressés à étudier l'influence du champ de vision vertical sur la perception des distances en environnement virtuel. Nous avons réalisé une étude expérimentale que nous présentons dans la partie III de ce document.

2) Le poids des HMDs : certes le HMD permet une immersion totale de l'utilisateur mais le principe de porter le dispositif constitue un inconvénient. En effet, le HMD se caractérise par son poids assez lourd et dérangeant, notamment pour une longue immersion.



FIGURE 2.5: Casque pour simuler le poids du HMD. Image tirée de [WCCRT09].

Dans une expérimentation, Grechkin *et al.* [GNP⁺10] ont examiné l'effet du poids du HMD sur

l'estimation des distances. Une comparaison est réalisée entre la perception des distances égocentriques en environnement réel, environnement réel vu à travers un HMD et environnement virtuel visualisé avec un HMD. Deux méthodes d'estimation des distances sont utilisées : le temps imaginé de la marche et la marche aveugle directe (voir le chapitre 4). Les estimations faites avec la première méthode sont similaires dans les deux environnements réels. Toutefois, avec la deuxième méthode, les participants sous estiment davantage les distances en environnement réel lorsqu'ils portent le HMD. Ce résultat implique que le poids du HMD n'a pas d'influence sur la perception des distances. La dégradation de l'estimation peut également être liée aux câbles du dispositif qui peuvent déranger lors de la marche aveugle directe. Par ailleurs, les distances sont sous estimées davantage dans l'EV, ce qui montre que le poids du HMD n'est pas la raison de la sous estimation des distances en EV.

Ce résultat est conforme au résultat trouvé par Willemsen *et al.* [WCCRT09]. Dans leur expérimentation, afin d'écartier l'influence du champ de vision restreint (avec le HMD), ils ont reproduit le poids du HMD par un casque porté sur la tête (même poids que le HMD), comme le montre la figure 2.5. Dans l'expérimentation, les auteurs comparent quatre conditions : EV vu avec un HMD, environnement réel vu à travers un HMD, environnement réel + casque sur la tête et environnement réel sans restriction. Les distances sont sous estimées avec les deux premières conditions en comparant à l'environnement réel sans restriction. Par ailleurs, les distances sont similaires dans les deux conditions : environnement réel + casque et environnement réel sans restriction. Ce résultat confirme que le poids du HMD n'est pas la raison principale de la sous estimation des distances en EV.

3) La visibilité du corps humain et du sol : en EV, la perception de notre corps entouré de la scène virtuelle n'est pas toujours possible à l'exception des CAVEs. En environnement réel, l'être humain s'appuie sur la position de son corps et la position de la cible pour juger de la distance égocentrique. L'absence de cet indice en EV peut induire des différences dans la performance lors de l'estimation des distances en EV. Creem-Regehr *et al.* [CRWGT05] ont étudié l'influence de la perception du corps sur l'estimation des distances en environnement réel.



FIGURE 2.6: Expérimentation en environnement réel avec restriction sur la visibilité du corps. Image tirée de [CRWGT05].

Dans leur expérimentation, les participants estiment les distances (2, 3.5, 5, 8, 10, 12m) en environnement réel dans deux conditions : environnement réel sans restriction et environnement réel sans la perception du corps, en utilisant la marche aveugle directe. Dans la deuxième condition, les participants portent un collier autour du cou afin de cacher leur corps et empêcher la perception du sol proche jusqu'à 1.5m, comme le montre la figure 2.6. Les distances sont presque précises dans les deux conditions. Ce

résultat implique que l'estimation des distances n'est pas forcément basée sur la perception du corps ni le sol proche lorsque l'environnement fournit tous les indices visuels.

Ce résultat est contradictoire avec le résultat trouvé dans [WOH04]. Dans cette étude, les sujets estiment les distances égocentriques en environnement réel. Plusieurs champs de vision verticaux sont testés, les mouvements de la tête sont interdits durant l'expérimentation. Les distances sont sous estimées lorsque le champ de vision est restreint à 21.1° . Dans cette condition lorsque le sujet voit la cible avec une hauteur des yeux fixée à 1.67m et un champ de vision vertical de 21.1° , la surface du sol est invisible jusqu'à 2.55m. Ce travail conclut que l'absence de la visibilité du sol proche peut être la raison de la sous estimation des distances.

Afin de vérifier cette conclusion, les auteurs ont réalisé une deuxième expérimentation. Dans cette dernière, pour estimer la distance, le sujet scanne le sol dans une seule direction soit de sa position à la cible ou inversement, de la cible à sa position. Les distances sont plus précises lorsque les sujets commencent par le sol proche. Ce résultat montre que le système visuel s'appuie principalement sur le sol proche pour construire une représentation visuelle de la surface et par conséquent pour l'estimation des distances.

La différence entre ces deux travaux peut être liée à d'autres paramètres de l'expérimentation comme le champ de vision horizontal. En effet, dans [WOH04] le champ de vision horizontal est restreint à 57.7° tandis que dans [CRWGT05] le champ de vision horizontal est celui de l'être humain. Probablement, dans ce dernier travail, le champ de vision horizontal large fournit des indices supplémentaires aidant à estimer plus précisément les distances même sans la perception du sol proche.

En environnement virtuel, certains dispositifs d'affichage comme les murs immersifs et les télé 3D ne fournissent pas un affichage sur le sol. Par conséquent, l'absence de cette projection au sol et les restrictions sur les autres propriétés du dispositif peuvent, ensemble, influencer la perception des distances en EV.

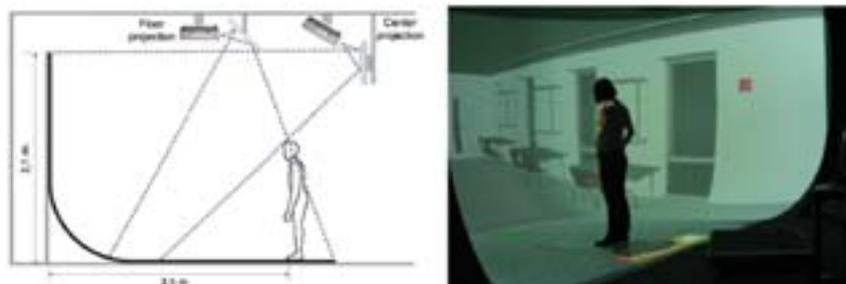


FIGURE 2.7: À gauche : image schématique de la projection avec l'écran semi sphérique. À droite : un utilisateur immergé en EV. Image tirée de [PdIRK⁺13].

En effet, dans l'expérimentation de Piryanova *et al.* [PdIRK⁺13] qui consiste à la comparaison des trois dispositifs d'affichage : l'écran semi sphérique, la cabine de simulation et le LSID, les distances sont sous estimées davantage avec le LSID en comparant à l'écran semi-sphérique. Dans ce dernier l'utilisateur voit son corps entouré de la scène virtuelle et voit sa position sur le sol en EV, comme le montre la figure 2.7. Cependant, avec le LSID l'utilisateur est à une distance de 0.83cm de l'écran et ne voit la scène virtuelle que sur ce dernier, la scène virtuelle n'est pas projetée sur le sol, comme illustré dans la figure 2.8. Tenant compte des résultats montrant qu'un champ de vision horizontal large n'améliore pas la perception des distances [ATdIR⁺10], la sous estimation dans cette expérimentation peut être liée à l'absence de la

projection sur le sol.

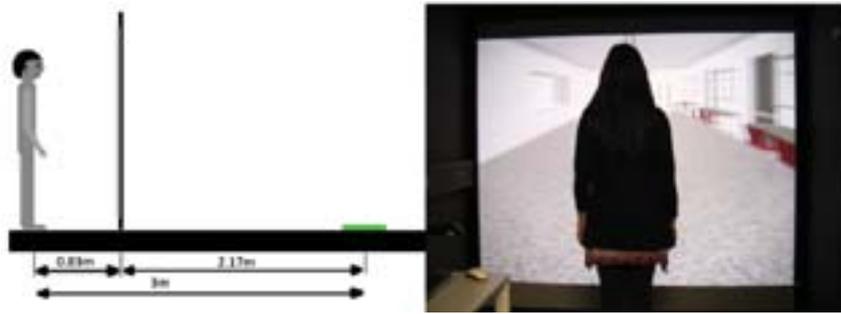


FIGURE 2.8: À gauche : image schématique de la projection avec le LSID. À droite : un utilisateur immergé en EV. Image tirée de [PdIRK⁺13].

La configuration technologique

Comme nous l'avons vu, le système perceptif humain fournit des indices visuels naturels pour la perception des distances comme la stéréoscopie et la parallaxe. Ces indices ne sont pas toujours fournis par les dispositifs d'affichage et peuvent altérer la perception des distances en EV.

1) La stéréoscopie et la parallaxe : la vision stéréoscopique représente un indice de profondeur pour la vision humaine naturelle. Lorsque la vision en EV est privée de cet indice, la perception des distances peut être affectée.

Piryankova *et al.* [PdIRK⁺13] ont examiné l'effet des facteurs de la stéréoscopie et de la parallaxe sur la perception des distances entre 2m et 5.5m (avec un pas de 0.5m) en EV avec un grand écran immersif. Dans cette étude, quatre conditions sont testées avec la présence ou l'absence des deux facteurs : 1) la stéréoscopie et la parallaxe, 2) la stéréoscopie sans la parallaxe, 3) la parallaxe sans la stéréoscopie et 4) sans stéréoscopie et sans la parallaxe. Le suivi des mouvements de l'utilisateur est présent uniquement dans les conditions où la parallaxe est présente. Le résultat montre que la stéréoscopie a une influence significative uniquement sur les petites distances égocentriques. Les distances sont moins sous estimées jusqu'à 2.5m avec l'affichage stéréoscopique. Au contraire, la parallaxe n'a pas d'influence significative sur la perception des distances. Toutefois, il est à noter que dans cette expérimentation les objets virtuels sont statiques et le sujet est uniquement encouragé à bouger sa tête pour l'effet de la parallaxe.

Dans une autre étude, Grechkin *et al.* [GNP⁺10] ont comparé la perception des distances entre 6m à 18m (avec un pas de 3m), dans plusieurs EV : 1) un EV visualisé avec un HMD, 2) un EV visualisé avec un LSID et 3) un EV photo réaliste visualisé avec le LSID. Dans ces deux derniers, l'affichage est sans stéréoscopie et sans la parallaxe. Les distances sont sous estimées avec le même taux d'erreur dans les trois conditions, avec le temps imaginé de la marche (voir chapitre 4). Le résultat implique que l'absence de la stéréoscopie ne dégrade pas la perception des distances.

Ce résultat est conforme au résultat de [PdIRK⁺13] pour les distances supérieures à 2.5m. Les auteurs de cette étude ont justifié la similarité dans l'estimation des distances entre les trois conditions par le grand champ de vision ($224^\circ \times 46^\circ$) fourni par le LSID. Probablement, le champ de vision large du LSID fournit des indices visuels supplémentaires à ceux fournis par le HMD ($40.5^\circ \times 49.5^\circ$), permettant ainsi de compléter l'absence de la vision stéréoscopique. Cependant, la différence entre les dispositifs d'affichage (LSID versus HMD) ne permet pas de tirer une conclusion sur l'effet de la stéréoscopie et la parallaxe sur

la perception des distances. En effet, une comparaison avec le même dispositif d'affichage est nécessaire pour éclaircir ce résultat.

Afin d'éliminer les différences entre les dispositifs d'affichage, Willemsen *et al.* [WGTCR08] ont étudié l'influence de la stéréoscopie sur l'estimation des distances (5, 10 et 15m) avec le HMD (champ de vision diagonal de 52°) en comparaison avec l'environnement réel. L'expérimentation compare plusieurs conditions : 1) environnement réel sans restriction, 2) EV avec une vision binoculaire et une distance interoculaire fixée à 6.5cm, 3) EV avec une vision binoculaire et une distance interoculaire adaptée à chaque participant et 4) EV avec une vision bi-oculaire (un œil à la fois). Les distances sont précises en environnement réel, et sous estimées en EV de 45%. Aucune différence significative n'est trouvée entre les trois conditions en EV. Ce résultat est conforme aux résultats précédents et implique que la sous estimation des distances en EV n'est pas liée aux effets de la stéréoscopie et de la distance interoculaire.

Dans une autre étude, Riecke *et al.* [RBS09] ont comparé l'estimation des distances (4, 5.5 et 7m) en environnement réel et EV sans vision stéréoscopique (HMD et petit écran). Le champ de vision est de $32^\circ \times 24^\circ$ dans les deux environnements. L'EV utilisé ne permet pas le suivi de mouvements et par conséquent, il ne fournit pas la parallaxe. Afin d'éliminer cette différence, les mouvements de la tête ne sont pas autorisés en environnement réel. Les participants ont été invités à rester inertes. Les estimations sont précises dans les deux environnements réel et virtuel. Par conséquent, conformément à la conclusion précédente, la stéréoscopie et la parallaxe ne sont pas forcément des éléments fondamentaux dans la perception des distances au delà de 2.5m.

La précision dans l'estimation des distances est contradictoire au résultat trouvé par Willemsen *et al.* [WGTCR08] où les distances sont sous estimées en EV avec le HMD. Cette différence est incompréhensible en raison de la similarité des deux expérimentations. En effet, dans les deux expérimentations les distances sont estimées avec la marche aveugle triangulée (voir chapitre 4) et l'environnement virtuel est une réplique de l'environnement réel. En outre les distances estimées sont dans l'espace d'action (plus de 2m).

2) Accommodation et convergence : certaines applications de réalité virtuelle, notamment les applications architecturales nécessitent une exploration de la scène virtuelle pour comprendre l'environnement visité. Lorsque la taille de l'espace physique permet à l'utilisateur de bouger physiquement pour explorer la scène virtuelle comme dans les grands CAVEs, la distance entre l'utilisateur et les écrans varie selon son déplacement. En outre, la distance entre lui et les objets de la scène varie en fonction de la position de ces derniers par rapport à l'écran. En effet, un objet de la scène peut être affiché sur l'écran avec une distance nulle ou derrière l'écran avec une distance négative ou devant l'écran avec une distance positive. La vision humaine s'appuie typiquement sur l'accommodation et la convergence. En EV, l'accommodation représente l'indice indiquant la distance à l'écran et la convergence indique la distance à l'objet virtuel, comme l'illustre la figure 2.9. Par conséquent, la variation de ces deux indices en EV peut influencer la perception des distances.

Bruder *et al.* [BASOL15] dans leur étude se sont intéressés à l'effet de ces deux indices sur la perception des distances en EV. Ils ont testé 5 distances à la cible combinées avec 5 distances à l'écran : 1, 3, 5, 7 et 9m. L'EV est constitué d'un CAVEs offrant un espace d'interaction d'environ 10m. Les résultats révèlent un effet asymétrique fort de la distance à l'écran et la distance à l'objet sur la perception des distances. Les distances sont presque similaires lorsque l'objet est affiché derrière ou sur l'écran, mais plus précise avec cette dernière. Cependant, les distances sont en moyenne surestimées lorsque l'objet est

affiché devant l'écran. Ce résultat peut être lié à l'inadéquation accommodation-convergence. Lorsque la distance diminue ou augmente, la différence accommodation-convergence augmente.

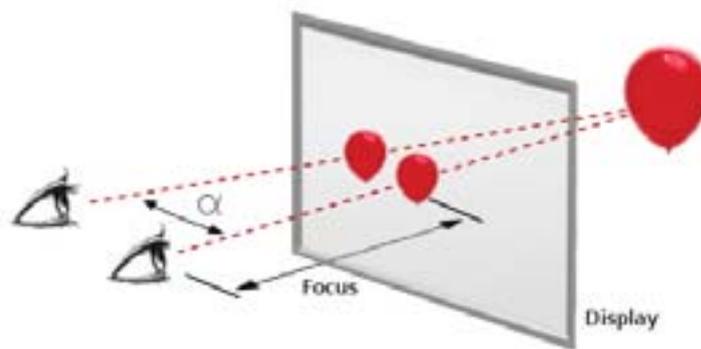


FIGURE 2.9: Exemple d'un objet affiché derrière l'écran avec une distance négative. Image tirée de [BASOL15].

3) Vision mono/binoculaire : d'autres problèmes se posent en raison des propriétés des dispositifs d'affichage comme la distance interoculaire, qui ont le potentiel d'altérer la disparité binoculaire d'une variété de façons.

Creem-Regehr *et al.* [CRWGT05] ont abordé ce problème en environnement réel, ils ont comparé la perception des distances sous 2 conditions : vision binoculaire et vision monoculaire. Cinq distances sont évaluées : 3.5, 5, 8, 10, 12m avec la marche aveugle directe. La scène correspond à un couloir d'un bâtiment universitaire. Pour la vision monoculaire, l'expérimentateur évalue, d'abord l'œil dominant qu'il utilisera dans l'expérimentation (l'œil non dominant est couvert). L'estimation des distances est similaire dans les deux conditions. Dans cette étude, l'environnement virtuel fournit assez d'informations monoculaires pour la perception des distances de telle sorte à ce que les indices binoculaires ne sont pas nécessaires pour estimer les distances. En effet, le couloir où l'expérimentation s'est déroulée contient plusieurs indices visuels comme la taille des objets (portes, dalles au faux-plafond), les ombres, etc., comme le montre la figure 2.10.



FIGURE 2.10: Environnement réel utilisé pour l'estimation des distances avec la vision mono/binoculaire. Image tirée de [CRWGT05].

Cette conclusion peut être appuyée par le travail de [VCOH14]. Dans cette étude Castell *et al.* ont

comparé l'estimation des dimensions d'une pièce (à l'échelle 1 :10) et de l'habitabilité avec la vision monoculaire et binoculaire en environnement réel. Aucune différence significative n'est trouvée entre les deux types de vision. Cependant, d'autres indices visuels comme la taille des objets ont donné une différence significative. Ce résultat signifie que les sujets s'appuient plutôt sur les indices monoculaires comme la hauteur dans le champ de vision et la taille des objets pour l'estimation des distances. Par conséquent, la vision binoculaire ne fournit pas d'informations supplémentaires à la perception de l'espace.

En environnement virtuel, Willemsen *et al.* [WGTCR08] ont comparé l'estimation des distances (5, 10 et 15m) entre le HMD et l'environnement réel. Afin de traiter l'influence de la vision mono/binoculaire, ils ont examiné plusieurs conditions : 1) environnement réel sans restriction, 2) environnement réel avec une vision monoculaire, 3) EV avec une vision binoculaire et une distance interoculaire fixée à 6.5cm, 4) EV avec une vision binoculaire et une distance interoculaire adaptée à chaque participant, 5) EV avec une vision bi-oculaire (un œil à la fois) et 6) EV avec une vision monoculaire. Les conditions avec la vision monoculaire permettent d'éliminer ou de diminuer la discordance de l'accommodation et de la convergence en EV. Par conséquent, si cette incompatibilité influence la perception des distances, les estimations seront différentes entre les conditions mono et binoculaire. Toutefois, les distances sont sous estimées d'environ 45% dans toutes les conditions en EV, et précises en environnement réel (dans les deux conditions), comme le montre la figure 2.11. Donc, la sous estimation des distances en EV ne provient pas forcément des indices monoculaire ou binoculaire comme la convergence et l'accommodation pour les distances dans l'espace d'action. En effet, l'accommodation et la convergence sont des indices visuels pour la perception des distances mais, plutôt, pour des distances dans l'espace personnel jusqu'à 2m [CV95].

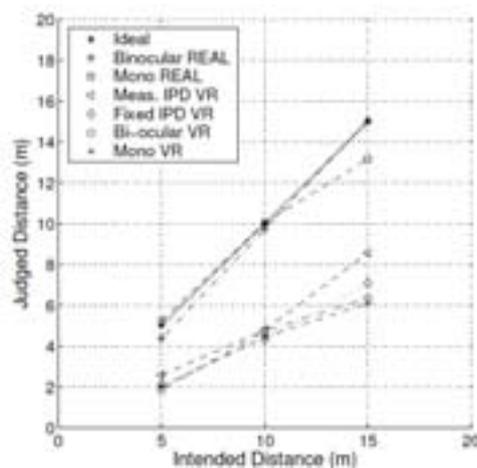


FIGURE 2.11: L'estimation des distances avec différents types de vision : monoculaire et binoculaire. Image tirée de [WGTCR08].

2.2.2 Facteurs compositionnels

En plus des caractéristiques et des paramètres des dispositifs d'affichage, l'EV comporte d'autres paramètres indépendants des dispositifs d'affichage comme le stimulus visuel (la scène virtuelle) et son contenu. Les facteurs compositionnels sont définis par Renner *et al.* [RVH13] comme les facteurs liés au type de la scène virtuelle (scène d'intérieure ou d'extérieure, réplique d'une scène réelle, etc.) et à son contenu (objet familier, avatar, etc.). Ces facteurs sont divisés dans l'état de l'art de Renner *et al.* en la disponibilité des indices visuels picturaux traitants des travaux sur la complexité de la scène virtuelle

(scène simple avec un seul objet sur un fond blanc, scène avec plusieurs objets et textures, etc), 2) *les avatars*, 3) *l'utilisation des objets familiers et d'une réplique de l'environnement réel*.

Là aussi nous apportons des modifications. D'abord, nous avons déplacé le facteur concernant *la qualité du rendu* (que nous renommons *le réalisme*) sous cette catégorie au lieu de la catégorie *des facteurs techniques* car les différents travaux présentés n'ont pas étudié les caractéristiques des cartes graphiques, ce qui peut être une caractéristique technique mais plutôt, ils ont étudié la qualité du rendu et l'utilisation des textures comme le rendu en fil de fer, le rendu photo réaliste. En outre, certains travaux ont étudié les scènes virtuelles qui sont une réplique de l'environnement réel, etc. C'est différents éléments sont liés à la qualité visuelle de la scène virtuelle et donc liées aux caractéristiques de l'EV.

Par ailleurs, nous avons regroupé les facteurs sur *les objets de taille familière et les avatars*, étudiés séparément dans l'état de l'art de Renner *et al.*, sous *les indices de l'échelle* dans notre état de l'art. Nous trouvons qu'un objet de taille familière placé en environnement virtuel représente un indice de l'échelle permettant de mettre à jour des distances inconnues en environnement virtuel. En outre, l'être humain est aussi familier avec la taille des êtres humains en conséquence, la taille de l'avatar dans la scène virtuelle représente un indice de l'échelle. Dans notre état de l'art, nous nous sommes intéressés uniquement à cette caractéristique des avatars.

D'après les travaux précédents l'estimation des distances est différente en fonction de la distance à estimer, pour cette raison nous avons rajouté aussi le facteur sur *l'intervalle de distance* sous cette catégorie car nous trouvons que la distance à estimer dépend de la position de l'objet ou des objets dans la scène virtuelle.

Finalement, nous avons rajouté les facteurs sur *l'exploration et l'interaction*. L'exploration de la scène virtuelle et l'interaction dépendent de l'EV proposé et donc représentent des caractéristiques de ce dernier. Sous ces facteurs, nous présentons les travaux qui ont étudié l'influence de la navigation, des rotations et de l'interaction en environnement virtuel.

Le réalisme

Sous *le réalisme* nous présentons les travaux sur le rendu des scènes virtuelles et l'utilisation des textures et des photos réalistes. Le réalisme de l'EV peut jouer un rôle dans la perception des distances. En effet, les textures fournies par l'environnement et le niveau de détail peut procurer des informations pour estimer les distances. Avec l'avancée des technologies, il est possible de modéliser un environnement réaliste soit avec des textures détaillées et un éclairage réaliste, soit en utilisant des photos réalistes prises de l'environnement réel.

Thompson *et al.* [TWG⁺04] se sont intéressés à l'influence du niveau de réalisme sur la perception des distances. Ils ont réalisé une comparaison entre l'environnement réel et trois EVs visualisés avec un HMD avec vision stéréoscopique. Le niveau de réalisme de la scène virtuelle est très varié entre ces trois conditions, comme le montre la figure 2.12. L'environnement réel est un hall d'un bâtiment universitaire. Cet environnement est reproduit comme scène virtuelle. Le rendu est différent entre les trois conditions, le premier environnement est reproduit à partir d'images panoramiques hautes résolutions. Dans la deuxième condition, le rendu est fait à partir de textures simples (avec un motif de carrelage pour le sol) avec une simple source de lumière et sans la présence des ombres ni d'illumination globale. Dans la troisième condition, la scène est juste visualisée sous forme de fil-de-fer.

Malgré cette différence dans la qualité de rendu, les distances sont sous estimées dans les trois

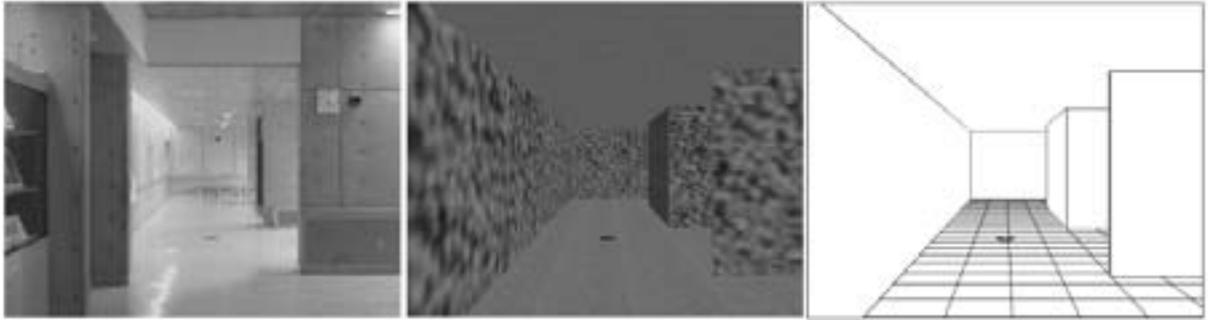


FIGURE 2.12: Trois niveaux de réalisme différents : un rendu à haute définition à partir de photo panoramique réaliste, rendu avec simple texture et éclairage, rendu en fil-de-fer, respectivement de gauche à droite. Image tirée de [TWG⁺04].

environnements avec presque le même pourcentage d'erreur. Cependant, les distances sont précises en environnement réel. Ce résultat conduit à dire que la qualité de rendu n'a pas d'influence significative sur l'estimation des distances. Par conséquent, d'autres facteurs restent à étudier.

Le même résultat est trouvé dans le travail de Grechkin *et al.* [GNP⁺10]. Ils ont trouvé une compression des distances avec un taux d'erreur similaire entre les trois conditions : 1) EV visualisé à travers un HMD, 2) EV visualisé avec un LSID, et 3) EV photo réaliste visualisé à travers un LSID, avec une estimation basée sur le temps imaginé de la marche. L'affichage est sans stéréoscopie ni parallaxe, uniquement avec le LSID. La hauteur des yeux est adaptée à chaque participant. Pour les trois conditions, la scène virtuelle est une reproduction de l'environnement réel. En l'occurrence, l'EV basé sur des photos panoramiques réalistes n'a pas permis d'améliorer la perception des distances, une reproduction fidèle de l'environnement réel suffit. En effet, dans les deux premières conditions la scène virtuelle est une reproduction précise de l'environnement réel de référence, comme le montre la figure 2.13. Elle fournit des informations visuelles comme les couleurs, les textures, la taille des objets. Par conséquent, l'utilisation des couleurs à partir de photos prises de l'environnement réel n'améliore pas forcément la perception des distances.



FIGURE 2.13: Environnement réel (gauche) et l'environnement virtuel reproduit (droite) utilisé dans l'expérimentation. Image tirée de [GNP⁺10].

Ces résultats sont contradictoires aux résultats présentés dans [RBS09]. Riecke *et al.* [RBS09] ont comparé la perception des distances dans les environnements réel et virtuel (HMD, écrans 24" et 50").

La scène virtuelle est une reproduction de l'environnement réel (à partir d'images). Le champ de vision est maintenu à $32^\circ \times 24^\circ$ pour les 4 conditions. L'exposition à l'environnement réel est faite après l'expérimentation en EV. Malgré le champ de vision restreint, les distances sont précises dans toutes les conditions et similaires entre l'environnement réel et l'EV.

Ce résultat montre que l'utilisation d'une scène virtuelle qui est une réplique de l'environnement réel avec une haute fidélité semble bien aider à estimer les distances. Cependant, cette étude est différente de l'étude précédente [TWG⁺04] dans la configuration : vision non stéréoscopique, absence de la parallaxe de mouvement, hauteur des yeux fixe à 1.1m. Nous notons aussi des différences avec [GNP⁺10] dans les dispositifs d'affichage LSID/HMD, la hauteur des yeux, la méthode d'estimation et le stimuli visuel. Par conséquent, nous ne pouvons pas comparer directement ces résultats.

Comme Grechkin *et al.* [GNP⁺10], Piryankova *et al.* [PdIRK⁺13] ont trouvé aussi une sous estimation des distances avec un environnement virtuel reproduit à partir de l'environnement réel, comme le montre la figure 2.14. Le dispositif d'affichage est un LSID comme dans [GNP⁺10]. Dans cette expérimentation une différence est trouvée entre les dispositifs d'affichage avec le même stimulus visuel. Ce résultat montre que la sous estimation n'est pas liée principalement à la scène virtuelle utilisée mais plutôt aux caractéristiques des dispositifs d'affichage.



FIGURE 2.14: Environnement réel (gauche) et l'EV reproduit (milieu et droite) utilisé dans l'expérimentation. La figure de droite illustre un exemple de la cible en EV. Image tirée de [PdIRK⁺13].

Par ailleurs, Interrante *et al.* [IRA06] ont trouvé une légère sous estimation des distances en EV. Cette bonne performance dans l'estimation des distances était expliquée par l'effet de la scène virtuelle. En effet, la scène est une réplique de la salle réelle où s'est déroulée l'expérimentation, la salle virtuelle est reproduite de manière réaliste avec des textures au sol et aux murs. Cependant, cette légère sous estimation indique que la problématique de la compression des distances en EV peut être causée par le processus cognitif lié à l'interprétation du stimulus visuel et non par le niveau de réalisme. En effet, les sujets ont déjà vu la salle réelle avant de commencer l'expérimentation. Cette exposition les a probablement aidés dans l'interprétation de la scène en EV.

Dans la tâche de l'estimation de distance où le sujet voit une cible puis reproduit la distance égocentrique sans la voir, comme avec la marche aveugle directe, le système visuel de l'être humain peut coder la position de la cible en se basant sur le sol. Plus précisément, il utilise le plan 2D sur lequel est placée la cible au lieu des informations 3D de l'environnement. Dans ce cas le sol représente une information de base pour l'estimation des distances.

En environnement réel, Sinai *et al.* [SOH98a] ont examiné l'influence des textures au sol. Dans cette expérimentation, le sol entre la cible et le sujet se compose de deux régions de textures différentes : une texture de béton et une texture de gazon. Pour estimer les distances (entre 4 et 7m avec un pas d'un

mètre), dans une condition, le sujet se met debout sur la texture de béton tandis que la cible est placée sur la texture de gazon et inversement pour la deuxième condition, comme le montre la figure 2.15. Dans les deux conditions, la discontinuité de la texture au sol conduit à une sous estimation de la distance égocentrique qui se dégrade avec la distance.

Pour comparer ce résultat, les sujets effectuent deux conditions de référence avec une seule texture au sol (gazon ou béton). Dans ces deux conditions les distances sont précises. Par conséquent, la texture au sol représente un indice visuel dans la perception des distances.

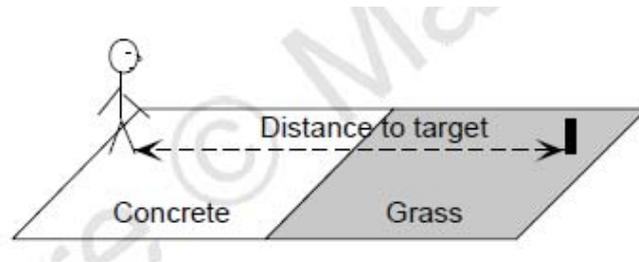


FIGURE 2.15: Le sujet est placé sur la partie du sol en béton et la cible est placée sur le gazon. Image tirée de [SOH98a].

Les indices de l'échelle

La taille standard de certains objets devient familière à l'être humain, fournissant ainsi un indice visuel acquis naturellement. Cette familiarité avec la taille des objets permet d'améliorer la perception des distances en EV. En effet, un objet familier placé en EV permet de mettre à l'échelle des distances inconnues dans l'EV. Nous présentons les différents travaux étudiant l'influence de l'intégration des objets et des avatars dans la scène virtuelle.

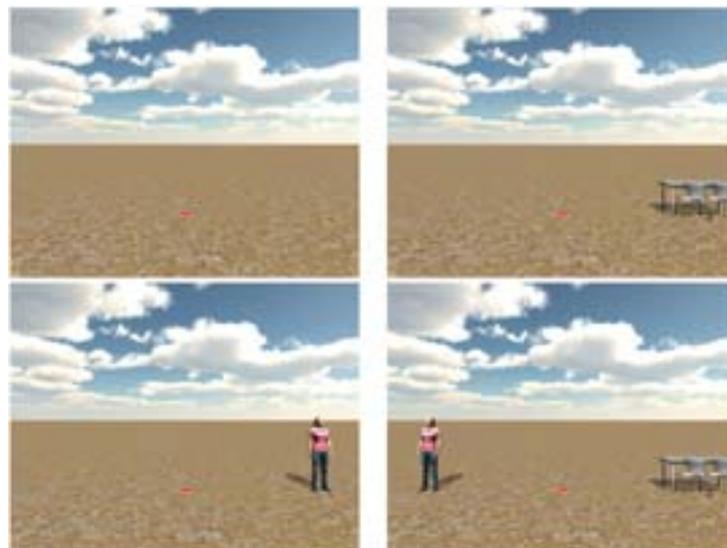


FIGURE 2.16: L'estimation des distances dans quatre conditions en variant la présence des objets familiers. Image tirée de [Sim14].

Simonic [Sim14] a examiné l'effet de différents objets familiers sur la perception des distances égocentriques en EV avec un HMD. Les sujets estiment verbalement les distances (3, 4, 5, 6m) dans

quatre conditions, comme le montre la figure 2.16. Dans la première condition, la cible est placée dans un EV sans aucun objet familier. Dans la deuxième condition, l'EV contient une table avec des chaises comme indices d'échelle. Dans la troisième condition, un avatar statique est placé en EV à la place de la table et des chaises. L'avatar sert uniquement d'indice d'échelle, aucune interaction n'est possible avec ce dernier qui mesure 1.72m. Dans la quatrième condition, l'EV contient l'avatar, la table et les chaises.

Les distances sont largement sous estimées dans les quatre conditions. En outre, le type de condition n'a pas d'influence significative sur l'estimation des distances à l'exception de la distance de 6m. Dans ce cas, les distances sont améliorées dans les deux conditions où la table et les chaises sont placées. Ce résultat conduit à deux conclusions : 1) les indices d'échelle sont plutôt utilisés pour les distances moyennes, 2) l'avatar n'est pas un indice d'échelle puissant. Cette dernière conclusion est probablement liée au fait que l'avatar fournit uniquement une information sur sa taille (qui est déjà variable entre les individus) tandis que la table et les chaises fournissent plusieurs informations sur la largeur, la profondeur et la hauteur.

Dans une autre étude Castell *et al.* [VCOH14] ont examiné l'effet de l'ameublement des pièces et la présence d'une silhouette sur l'estimation des distances. Les sujets estiment les distances dans deux types de pièces : meublée et non meublée. Pour la moitié des sujets, une silhouette d'un homme mesurant 1.78m est rajoutée sur le mur d'en face de la pièce comme indice d'échelle, comme le montre la figure 2.17. Les résultats ont montré que : 1) la condition d'ameublement n'a pas d'influence sur l'estimation de la largeur, 2) la profondeur est moins surestimée dans la condition meublée lorsque l'indice d'échelle est présent, 3) la condition d'ameublement influence la perception de la hauteur uniquement dans l'absence de l'indice d'échelle, la hauteur est surestimée davantage dans la condition meublée, 4) la largeur et la profondeur sont sous-estimées dans l'absence de l'indice d'échelle. Contrairement à [Sim14], ces résultats montrent que l'information d'échelle fournie par la taille de la silhouette permet de mieux comprendre l'échelle de l'environnement et de mieux estimer les distances.

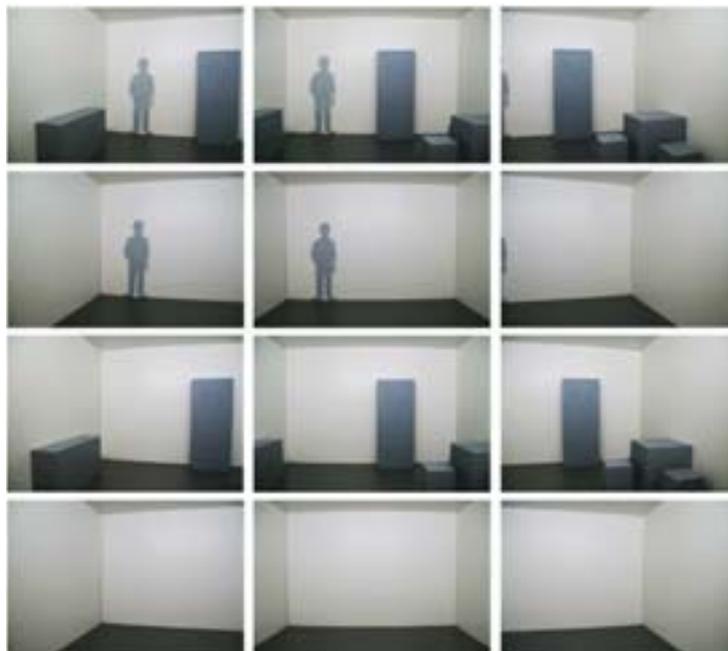


FIGURE 2.17: Variation de l'ameublement et de la présence de l'indice d'échelle entre les conditions pour l'estimation des dimensions. Image tirée de [VCOH14].

Les résultats de ces deux travaux montrent que le type de l'indice d'échelle et l'information qu'il fournit influence différemment la perception des distances en EV. En effet, dans le travail de Simonic [Sim14], l'avatar n'a pas d'influence significative sur la perception des distances car la taille familière qu'il fournit correspond à sa taille sur l'axe y et non pas sur l'axe z (des distances égocentriques). En outre, dans [VCOH14], la silhouette affichée sur le mur influence l'estimation de la hauteur qui se trouve sur le même axe que l'information de la taille fournie par la silhouette (axe y). Probablement, les indices d'échelle influencent davantage les distances qui se trouvent sur le même axe que l'information fournie.

L'intervalle de distance

Selon Cutting *et al.* [CV95] les distances dans l'environnement visuel se divisent en trois sous espaces : l'espace personnel (jusqu'à 2m), l'espace d'action (entre 2 et 30m) et l'espace éloigné (plus de 30m). D'après les résultats présentés précédemment, l'estimation des distances n'est pas identique dans ces trois sous espaces. En effet, les distances sont généralement surestimées dans l'espace personnel et sous estimées dans les deux autres sous espaces.

Creem-Regehr *et al.* [CRWGT05] ont trouvé que le taux d'erreur augmente avec la distance (2, 3.5, 5, 8, 10, 12m) lorsque l'estimation est faite avec la marche aveugle directe. Par conséquent, la perception des distances se dégrade avec la distance,

Dans une autre étude, Plumert *et al.* [PKCR05] ont examiné la perception des distances pour les distances : 6, 9, 12, 15, 18 et 21m. En l'occurrence, les estimations sont presque précises avec le temps imaginé de la marche et la marche aveugle directe.

Au contraire, Alexandrova *et al.* [ATdIR⁺10] dans leur expérimentation ont trouvé une différence dans l'estimation des distances. Ces dernières sont estimées en EV avec un écran semi-sphérique sans stéréoscopie. Les participants jugent verbalement plusieurs distances égocentriques entre 2m et 5.5m avec un pas de 0.5m. Les participants surestiment significativement la distance de 2m. Dans ce cas la cible est affichée sur le sol. En outre, la distance de 2.5m est légèrement sur estimée mais presque précise. Au contraire, la distance de 3m est légèrement sous estimée mais presque véridique. Par ailleurs, les distances de plus de 3m sont significativement sous estimées, comme le montre la figure 2.18. En l'occurrence, la cible est projetée soit sur l'écran semi-sphérique soit derrière. Ce résultat montre une influence de la distance à la cible et de la position de sa projection : devant, sur ou derrière l'écran d'affichage, comme trouvé dans [BASOL15].

L'exploration et l'interaction

Le champ de vision permet d'obtenir des informations sur l'environnement qui nous entoure. Lorsque les dispositifs d'affichage ont un champ de vision restreint, ces informations acquises habituellement diminuent. L'exploration visuelle de l'EV avec les mouvements et les rotations de la tête réduit ce problème. Si un utilisateur porte un HMD, il peut voir une partie de la scène qui est couverte par le champ de vision du dispositif. Si en plus il est encouragé et autorisé à tourner sa tête sur les cotés, il peut obtenir plus d'indices visuels et ainsi plus d'informations sur l'espace. La combinaison du champ de vision restreint et de rotations de la tête est le sujet de plusieurs études.

Creem-Regehr *et al.* [CRWGT05] dans leur expérimentation ont examiné l'effet du champ de vision et des rotations de la tête sur l'estimation des distances en environnement réel. Ils comparent trois conditions : 1) champ de vision humain avec rotation de la tête, 2) champ de vision restreint ($42^\circ \times 32^\circ$) avec rotation

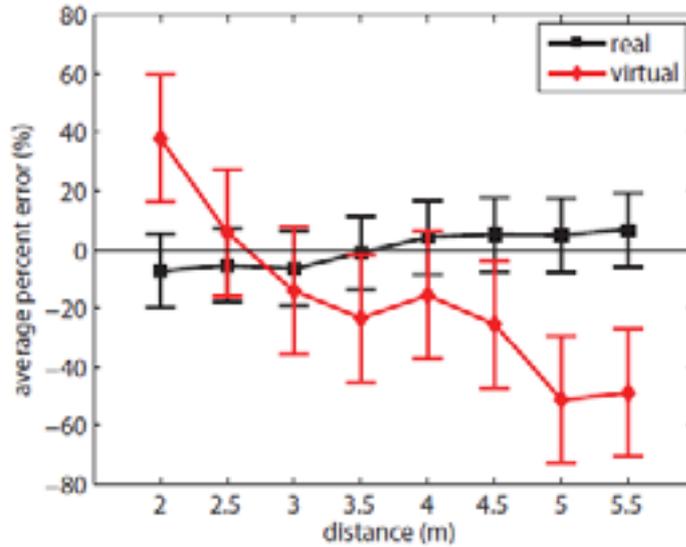


FIGURE 2.18: Résultat de l'estimation des distances dans l'intervalle de 2 à 5.5m. Image tirée de [ATdIR⁺10].

de la tête et 3) sans rotation de la tête. Dans le cas du champ de vision restreint les participants ont porté des lunettes que l'expérimentateur a réglé pour obtenir le champ de vision restreint, la distance interoculaire est réglée selon chaque participant. Lors de la restriction des rotations de la tête, les participants portent un collier médical autour du cou, comme le montre la figure 2.19. Dans les deux premières conditions les distances sont presque précises. Dans ces conditions tous les indices visuels sont fournis naturellement. Cependant, lorsque les rotations de la tête ne sont pas autorisées, les distances sont sous estimées. La différence des estimations entre le champ de vision restreint, avec et sans rotation de la tête, montre que ces dernières permettent de fournir des indices visuels complémentaires à ceux fournis par le champ de vision restreint, ce qui a conduit à des estimations plus précises.

La vision est la modalité sensorielle principale pour la perception des distances. En EV, la vision humaine est altérée pour plusieurs raisons (champ de vision, stéréoscopie, etc.), par conséquent les informations sur la distance sont réduites. D'autres modalités fournissent aussi des informations sur la distance comme la marche. En effet, lorsque l'on se déplace, la marche fournit des informations visuelles, vestibulaires et proprioceptives, permettant de calibrer la perception des distances. Par ailleurs, le retour tactile fourni par le toucher procure aussi des informations de calibration aidant à la perception des distance.

Interrante *et al.* [IRA06] ont examiné l'effet de l'interaction en EV avec retour haptique, sur l'estimation des distances. Le sujet voit une cible à trois distances 3, 6 et 9m, puis les estime avec la marche aveugle directe. La scène virtuelle utilisée est une reproduction de la salle réelle où s'est déroulée l'expérimentation. Cette dernière consiste en quatre conditions : 1) environnement réel, 2) environnement virtuel sans tâche d'interaction, 3) environnement virtuel avec une tâche d'interaction et 4) environnement réel. Le sujet effectue l'expérimentation dans les quatre conditions. Dans la troisième condition, une table réelle est placée dans l'environnement réel et rajoutée en environnement virtuel afin que le sujet ait des retours haptique lors de son interaction en EV, comme le montre la figure 2.20. L'interaction consiste à réaliser des constructions avec un système de modelage immersif pendant 10 minutes. Ensuite, la table est



FIGURE 2.19: Estimation des distances en environnement réel avec le champ de vision limité et restriction sur la rotation de la tête. Image tirée de [CRWGT05].

enlevée des deux environnements et le sujet estime les distances. L'intérêt de la dernière condition est de voir l'effet de la transition entre l'interaction en EV et l'environnement réel.



FIGURE 2.20: La figure de droite montre l'EV utilisé pour la tâche d'interaction. La figure de gauche montre la table placée dans l'environnement réel pour fournir le retour haptique. Image tirée de [IRA06].

Les distances sont légèrement surestimées dans les deux conditions en environnement réel. En outre, elles sont (légèrement) surestimées davantage après la phase d'interaction en EV. Au contraire, les distances sont sous estimées en EV dans les deux conditions. Une amélioration est remarquée après la phase d'interaction en EV uniquement pour la distance de 9m.

Par ailleurs, Waller *et al.* [WR08] ont réalisé une expérimentation pour étudier l'effet de l'interaction en EV sur l'estimation des distances en environnement réel. L'interaction dans cette étude correspond à la navigation avec la marche physique en EV. Cette expérimentation consiste en trois phases : deux en environnement réel (*pré et post-interaction*) et une phase en EV (*interaction*). Dans les phases *pré et post-interaction* les sujets estiment des distances en environnement réel avec la marche aveugle directe (voir chapitre 4). Dans la phase *interaction*, les sujets observent une cible en EV à travers un HMD puis

marchent physiquement les yeux ouverts vers la cible. Dans cette phase l'expérimentateur ne donne aucune information sur la distance. Après la phase *interaction* les sujets surestiment les distances de 10% par rapport aux estimations faites dans la phase *pré-interaction*.

Marcher les yeux ouverts vers une cible en EV, puis juger les distances permet de calibrer la perception des distances en EV [WR08]. En effet, lorsque le sujet entre en EV, la perception n'est pas adaptée à l'environnement, lorsque le sujet se déplace physiquement en EV, sa perception des distances est recalibrée avec l'action de la marche. Cependant, combien de temps est nécessaire pour cette période de navigation pour calibrer la perception des distances en EV ?

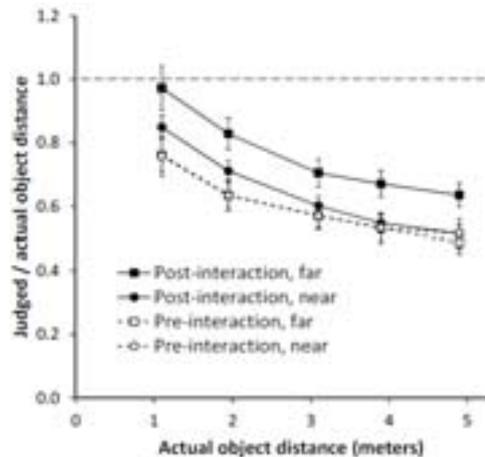


FIGURE 2.21: Influence de la navigation (proche ou loin) sur l'estimation des distances. Image tirée de [KHSS14].

Kelly *et al.* [KHSS14] dans leur expérimentation, ont examiné cette problématique en EV avec un HMD. En effet, comme dans [WR08], le sujet effectue deux phases d'estimation des distances où il estime 5 distances : 1.1, 1.95, 3.1, 3.9 et 4.9 m avec la marche aveugle directe et une phase de navigation. Dans cette dernière, le sujet parcourt 5 distances différentes 1, 2, 3, 4 et 5 m (block d'interaction), sans aucune information sur la distance parcourue. Trois blocs estimation/navigation sont effectués par chaque sujet afin de vérifier le nombre de blocs d'interaction nécessaires pour recalibrer la perception des distances EV, si cette dernière est améliorée. Les distances sont sous estimées avant la phase de navigation mais après cette dernière les distances s'améliorent significativement de 13%. Les deux phases de navigation suivantes continuent à améliorer la perception des distances (3 à 4%), mais l'effet est considérablement réduit par rapport à l'effet du premier bloc. Ces résultats indiquent que le calibrage de la perception résultant de la navigation dans l'EV se produit rapidement. Toutefois, il diminue dans les phases suivantes. En conclusion, une courte période de navigation pour le calibrage action/perception des distances est suffisante pour améliorer la perception des distances à un niveau acceptable.

Dans une expérimentation [KHSS14] étudie la distance de navigation nécessaire pour le calibrage de la perception de différentes distances. Dans cette étude, la distance de navigation varie entre deux groupes. Le premier groupe marche des distances de 1 et 2m tandis que le deuxième groupe marche des distances de 3 et 4m. Les distances à estimer avec la marche aveugle directe sont les mêmes pour les deux groupes 1.1, 1.95, 3.1, 3.9 et 4.9 m. Marcher de petites distances produit des améliorations sélectives sur l'estimation des distances. En effet, elle améliore l'estimation des distances proches jusqu'à 1.95m mais pas les autres distances, comme le montre la figure 2.21.

En revanche, marcher davantage produit des améliorations uniformes sur l'estimation des distances, indépendamment de la distance à la cible. En outre, marcher des distances moyennes conduit à des améliorations nettement meilleures. Une raison possible pour le transfert asymétrique de recalibrage est que la marche vers une cible lointaine implique nécessairement la marche de distances courtes et longues. En d'autres termes, marcher vers un objet à 5m nécessite de marcher à des distances de 1, 2, 3, et 4 m.

Les dispositifs d'affichage comme les grands écrans ne permettent pas de naviguer en marchant physiquement, contrairement aux HMD ou la vraie vie. En conséquence, certaines informations importantes comme les indices proprioceptifs, susceptibles d'améliorer la perception des distances en EV, sont perdues.

Campos *et al.* [CBB12] se sont intéressés à l'information utilisée pour estimer les distances en EV avec la marche passive et active. Dans ce cas, les sujets estiment les distances dans plusieurs conditions. 1) la marche physique + la vision : dans cette condition le sujet voit une cible puis se déplace vers la cible en gardant ses yeux ouverts jusqu'à l'atteindre. 2) La vision : dans cette condition le sujet voit la cible puis se déplace passivement dans la scène virtuelle pour atteindre la cible en restant debout physiquement. Dans ce cas la navigation est passive, le sujet se voit se déplacer dans la scène sans qu'il bouge physiquement. 3) La marche sans la vision : le sujet voit la cible puis marche la distance les yeux fermés jusqu'à un signal d'arrêt. Après chaque phase de navigation (passive ou active), le sujet estime la distance à la cible en réglant en EV la position d'une autre cible, comme le montre la figure 2.22. Les deux dernières conditions permettent d'isoler l'information visuelle (condition 2) des informations vestibulaire et proprioceptive (dans la condition 3).

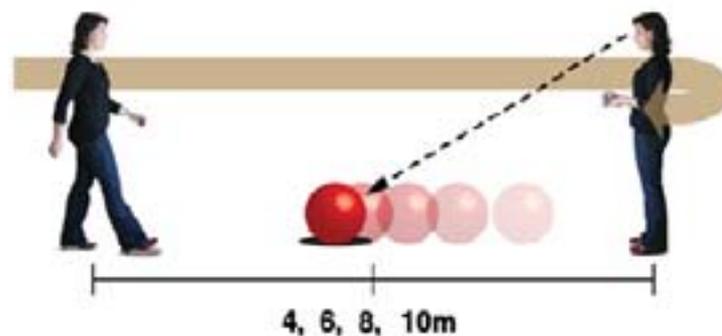


FIGURE 2.22: La tâche d'estimation des distances égocentriques, en réglant la distance à la cible selon la distance parcourue (activement ou passivement). Image tirée de [CBB12].

Les distances sont mieux estimées dans la condition 3 avec la navigation sans la vision. Les estimations faites dans la condition 1, où les informations visuelles et les informations basées sur le corps (vestibulaire et proprioceptive) sont présentes, sont entre les estimations de la condition 2 avec juste la vision et la condition 3 où seules les informations basées sur le corps sont présentes. Ce résultat montre que les sujets s'appuient sur les deux informations : visuelle et basée sur le corps lorsqu'elles sont présentes ensemble. Cependant, l'information basée sur le corps permet de mieux estimer les distances avec la navigation.

Dans une autre expérimentation, Campos *et al.* [CBB12] ont examiné l'information utilisée en l'absence de l'information proprioceptive lorsque les sujets se déplacent en chaise roulante. Dans cette condition, le sujet se déplace en EV à l'aide d'une chaise roulante, le déplacement se fait avec la vitesse de la marche du sujet (enregistrée auparavant). En l'occurrence, uniquement les informations vestibulaire et

visuelle sont présentes. Dans une autre condition, le sujet se déplace passivement en EV. En l'occurrence, seule l'information visuelle est présente. L'estimation des distances dans la première condition est proche de celle dans la deuxième condition. Ce qui signifie que l'information visuelle est plus utilisée que l'information vestibulaire pendant le déplacement passif.

La vitesse de navigation en EV semble influencer aussi la perception des distances. En effet, dans cette dernière expérimentation, dans une autre condition le sujet voit une cible puis, se déplace vers la cible en gardant ses yeux ouverts. Lors de la navigation, la vitesse est variée avec un gain visuel de 0.7, 1 (gain nul) et 1.4. En d'autres termes, dans ce dernier cas, lorsque le sujet marche physiquement 10m la distance visuelle sera égale à 14m. Le gain visuel a une influence significative sur la tâche de l'estimation des distances après la navigation. Les estimations sont plus grandes de 3.5% avec le gain 1.4 en comparaison aux estimations faites sans gain (1.0) tandis que les estimations avec le gain de 0.7 sont plus petites de 6% par rapport au gain nul. Ce résultat implique que la perception de la vitesse lors de la navigation influence l'estimation des distances en EV.

2.2.3 Facteurs humains

En plus des facteurs liés aux dispositifs d'affichage et à l'EV de manière globale, les différences entre les êtres humains peuvent influencer également la perception des distances en EV. Renner *et al.* [RVH13] ont défini cette catégorie comme les caractéristiques psychologiques des êtres humains et la différence entre ces derniers. Dans notre état de l'art, nous nous sommes intéressés uniquement à la différence entre les individus concernant l'âge, le sexe et le style d'apprentissage (profil cognitif).

L'âge et le sexe

Les capacités acquises avec l'âge sur l'estimation des distances peut influencer l'estimation des distances. Les connaissances et les expériences dans l'estimation des distances chez les adultes ne sont pas les mêmes que chez des enfants. Par exemple, les personnes adultes dans leur vie ont eu plus d'expériences où ils étaient dans des situations pratiques d'estimation des distances comme l'achat de meubles pour la maison, les visites de maison pour un déménagement, etc. Les enfants par contre manquent d'expérience ce qui peut dégrader leur estimation des distances que ce soit en environnement réel ou virtuel.

Plumert *et al.* [PKCR05] ont comparé 3 différentes tranches d'âge : des enfants de 10 ans, des enfants de 12 ans et des adultes dans l'estimation des distances en environnement réel et virtuel. Étonnement, les adultes et les enfants de 12 ans ont eu les mêmes performances d'estimation des distances dans les deux environnements. Cependant, les enfants de 10 ans ont sous-estimé davantage les distances dans l'EV que le réel. La difficulté de ces derniers à s'adapter et utiliser l'EV en raison de leur très jeune âge peut être une éventuelle explication à ce comportement différent.

Par ailleurs, Creem-Regehr *et al.* [CRWGT05] ont comparé l'estimation des distances entre les hommes et les femmes. Aucune différence significative n'est trouvée entre les deux sexes. Ce résultat est conforme au résultat trouvé dans [IRA06]. En effet, Interrant *et al.* ont analysé les estimations des distances en considérant le sexe des participants. Les résultats ont montré une performance similaire entre les hommes et les femmes.

Le style d'apprentissage

Hauptman et Cohen [HC11] ont étudié l'influence d'un nouveau facteur *le style d'apprentissage* sur l'interaction avec l'environnement virtuel dans le contexte de l'apprentissage géométrique. Parmi les styles d'apprentissage, ils ont étudié le profil cognitif **VAK** que nous définissons dans le chapitre 5, section 5.1.3. Les résultats obtenus ont montré que l'amélioration de l'apprentissage avec l'utilisation de l'environnement virtuel était meilleure pour les étudiants avec le profil visuel. Les auteurs concluent que l'utilisation de l'environnement virtuel améliore l'apprentissage pour les différents profils cognitifs VAK en fonction des caractéristiques de l'environnement virtuel. En effet, dans leur étude l'information visuelle était la caractéristique la plus dominante. Ce travail ne traite pas la problématique de l'estimation des distances en environnement virtuel néanmoins, nous le présentons car le style d'apprentissage peut être un facteur qui influence l'estimation des distances.

En effet, cette dernière peut se faire selon plusieurs stratégies soit à l'intuition, soit en faisant des calculs, etc. Ces stratégies varient en fonction des personnes et peuvent dépendre du style d'apprentissage et de l'information dominante dans l'environnement virtuel. En conséquence, le style d'apprentissage peut avoir un effet sur l'estimation des distances en environnement virtuel en fonction du profil cognitif **VAK**. Toutefois, nous n'avons trouvé aucun travail étudiant cet effet.

2.3 Les améliorations de la perception des distances en environnement virtuel

Dans la section précédente nous avons présenté un éventail des facteurs influant la perception des distances en EV et réel. Bien que les résultats obtenus ne permettent pas de cerner les facteurs, des travaux existants proposent des idées pour l'amélioration de l'estimation des distances dans des contextes spécifiques. Cette section regroupe quelques exemples de ces améliorations. Nous les différencions en fonction du facteur abordé.

2.3.1 La correction des estimations

Les facteurs influant la perception des distances peuvent être liés à l'EV ou à l'être humain. Une solution éventuelle pour remédier à ce problème de mauvaise perception des distances en EV et réel est de fournir des retours sur les estimations données au fur et à mesure de la tâche d'estimation des distances. En effet, ces retours permettent aux sujets de corriger leur estimation et ainsi d'améliorer la perception des distances.

Richardson *et al.* [RW05] ont examiné l'influence de la correction directe des estimations sur la tâche de l'estimation des distances égocentriques et exocentriques en EV. L'expérimentation consiste en trois phases : une phase *pré-test* (avant la phase d'entraînement), une phase *post-test* (après la phase d'entraînement) où le sujet estime des distances égocentriques ou exocentriques (selon la condition) sans correction. Une phase *d'entraînement* où le sujet reçoit une correction pour chaque distance estimée. Les estimations sont faites avec la marche aveugle directe, les distances estimées sont 75, 125, 225, 350 et 425 cm. Les corrections sont affichées de manière schématique avec le HMD comme le montre la figure 2.23 où le sujet voit la position de départ (ou de la première cible pour les distances exocentriques) et la

position de la cible, la distance marchée est représentée avec un trait entre les deux positions. En outre, une correction numérique est affichée avec la distance réelle et la distance marchée en mètre.

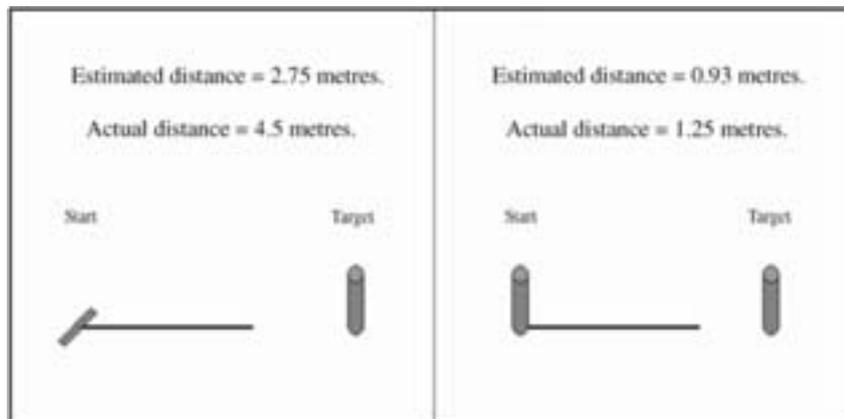


FIGURE 2.23: Exemple des corrections données aux participants pour les distances égocentriques (gauche) et exocentriques (droite). Image tirée de [RW05].

La phase d'entraînement améliore la précision dans l'estimation des distances égocentriques et exocentriques. En effet, les distances égocentriques et exocentriques sont sous estimées avant la phase d'entraînement et presque précises ou parfois surestimées après l'entraînement. Afin de vérifier la persistance de cette amélioration au cours du temps, les sujets ont refait la tâche de l'estimation après une semaine. Les distances sont similaires à celles estimées juste après la phase d'entraînement.

Dans une autre étude [RW07] ont proposé une autre correction visuelle permettant de calibrer la perception des distances en EV. En effet, au lieu de donner des corrections explicites sur les estimations [RW05], dans une phase *d'interaction*, les sujets parcourent la distance les yeux ouverts, afin de corriger et d'améliorer les estimations faites avec la marche aveugle directe, dans la phase *post-test*. Les sujets réalisent une phase *pré-test* comme condition de base pour examiner l'effet de l'interaction en EV sur les estimations. Dans la phase *pré-test*, les distances égocentriques sont sous estimées de 49%. Les corrections implicites acquises lors de la phase *d'interaction* améliorent l'estimation des distances. Les distances sont presque précises dans la phase *post-interaction*.

L'amélioration avec les corrections implicites peut être liée à l'adoption d'une stratégie explicite comme "marcher plus loin qu'il paraît". En effet, ceci est possible car la phase *d'interaction* ressemble à la méthode d'estimation utilisée (la marche aveugle directe). Afin d'examiner cette hypothèse, les auteurs ont réalisé une autre expérimentation. Dans cette dernière les sujets estiment les distances soit avec la marche aveugle directe soit avec la marche aveugle indirecte (voir chapitre 4). Les corrections implicites améliorent l'estimation des distances avec les deux méthodes utilisées. Ce résultat confirme l'effet de correction de la perception et non pas l'effet de stratégie.

Les corrections implicites avec la réalisation de l'action de la marche en EV permet une amélioration meilleure de l'estimation des distances qu'avec les corrections explicites [RW07].

2.3.2 Les avatars

Selon les résultats de certain travaux, il semble que la visibilité du corps dans l'EV peut influencer la perception des distances [WOH04, NCDT09] car la position du corps fournit un repère visuel important pour la perception de la profondeur. Partant de cette idée, des travaux proposent comme amélioration pour

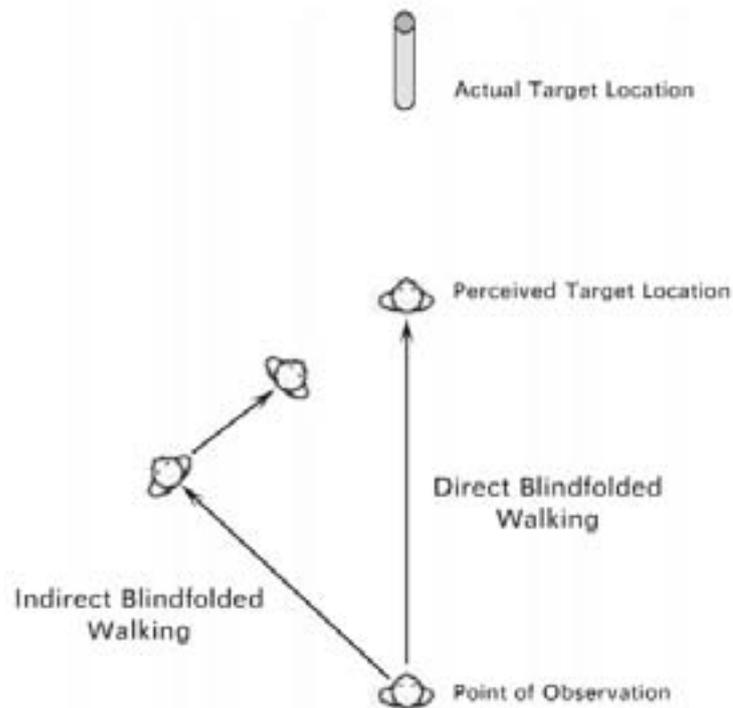


FIGURE 2.24: La tâche d'estimation des distances après la phase d'interaction en EV. Image tirée de [RW07].

la perception des distances en EV, l'utilisation des avatars virtuels pour représenter le corps humain dans l'EV.

Dans les travaux présentés ci-dessus, nous avons vu que l'utilisation de scènes réalistes améliore la perception des distances en EV. Phillips *et al.* [PRKI10] suggèrent une solution alternative à l'utilisation de scènes réalistes, en proposant d'améliorer la perception des distances dans des scènes non réalistes par l'ajout d'avatars dynamiques. Ils comparent trois conditions : 1) environnement réel, 2) EV + sans avatar et 3) EV + avatar dynamique. Ce dernier reproduit de manière fidèle les gestes du sujet, il est animé à partir de ses mouvements réels capturés. Le sujet estime les distances égocentriques avec la marche aveugle directe. L'EV est visualisé à travers un HMD. Dans la condition avec avatar, le sujet baisse la tête pour voir la position de ses pieds, comme le montre la figure 2.25 puis, regarde la cible et estime la distance. Au contraire, dans la deuxième condition, le sujet regarde directement la cible sans baisser la tête puisqu'il n'y a aucun indice sur sa position.

Les distances sont sous estimées en EV comparativement à l'environnement réel même avec la présence de l'avatar dynamique. Cependant, l'erreur entre l'environnement réel et l'EV avec l'avatar est significativement petite par rapport à l'EV sans l'avatar. Par conséquent, la présence de l'avatar dynamique dans une scène non réaliste ne compense pas l'absence d'une scène réaliste comme scène virtuelle mais améliore la perception des distances comparativement à une scène virtuelle non réaliste seule.

Par ailleurs, Mohler *et al.* [MCRTB10] ont étudié l'influence de la forme de représentation du corps en EV sur la perception des distances égocentriques. Trois types de représentations sont examinés : avatar statique, avatar dynamique, marqueur au sol (pour représenter la position du corps). Dans le cas de l'avatar dynamique, ce dernier reproduit de manière fidèle les gestes du sujet grâce à un système de suivi des mouvements. En plus du type de représentation, les auteurs ont étudié l'influence de la position de la



FIGURE 2.25: De gauche à droite : scène virtuelle non réaliste et position de l’avatar dynamique dans cette dernière. Image tirée de [PRKI10].

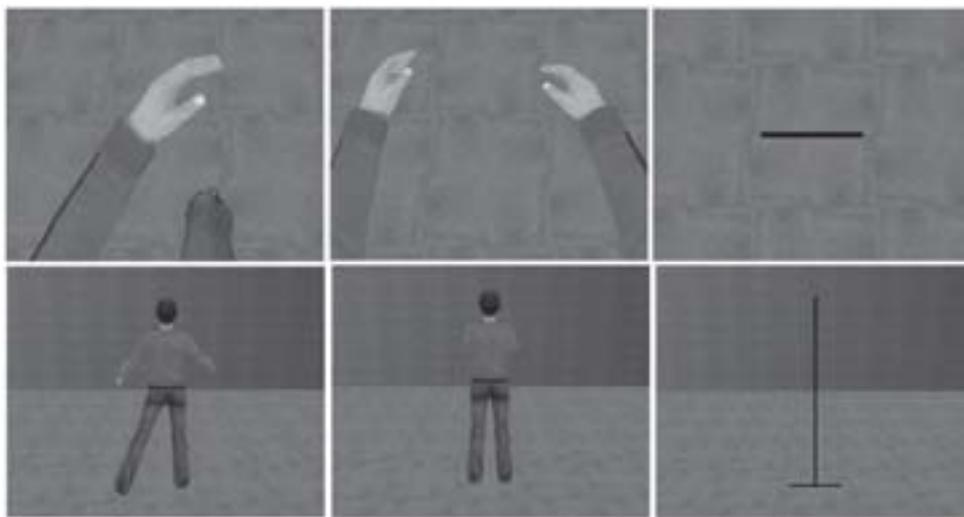


FIGURE 2.26: Sur les deux lignes : trois représentations du corps humain en EV, de gauche à droite : avatar dynamique, avatar statique, marqueur au sol. De haut en bas : représentation à la première personne et représentation à la troisième personne. Image tirée de [MCRTB10].

représentation du corps en EV sur la perception des distances. En effet, les représentations sont placées selon deux localisations : en première personne (la représentation du corps est colocalisée avec la position de la caméra virtuelle), en troisième personne (la représentation du corps est localisée à 3m devant la position de la caméra virtuelle), comme le montre la figure 2.26. Dans cette expérimentation les sujets voient la scène virtuelle à travers le HMD et doivent estimer les distances égocentriques (4m, 5m et 6m) par rapport à une cible avec la marche aveugle directe (voir chapitre 4).

La présence de l’avatar influence la perception des distances en EV avec les deux types d’avatar comparativement au marqueur. Une explication à ce résultat est que l’avatar sert d’indice de taille familière et permet de comprendre l’échelle de la scène virtuelle. Cependant, l’amélioration est meilleure avec l’avatar dynamique. Par ailleurs, la localisation de la représentation influence aussi l’estimation des distances. Toutefois, cette influence est faible par rapport à l’influence de la forme de la représentation. Au final, pour une amélioration de la perception des distances, l’utilisation d’un avatar dynamique reproduisant les mouvements réels de l’être humain est préférable.

Ragan *et al.* [RWCB12] ont proposé plusieurs types d’avatars pour représenter le corps humain en EV

afin d'améliorer la perception des distances. Leur résultat est conforme au résultat précédent concernant l'avatar dynamique. Leur expérimentation compare la perception des distances dans six conditions : 1) salle réelle, 2) salle virtuelle sans avatar, 3) salle virtuelle + avatar statique, 4) salle virtuelle + avatar animé, 5) salle virtuelle + avatar dynamique et 6) salle virtuelle + deux avatars, comme le montre la figure 2.27. Dans la condition quatre, l'avatar bouge dans la scène indépendamment des mouvements du sujet tandis que dans la condition cinq, l'avatar suit exactement les mouvements du sujet grâce aux données de mouvement capturées. Dans la dernière condition, deux avatars bougent dans la scène. L'expérimentation est réalisée sur un écran d'ordinateur, les sujets estiment les distances exocentriques et égocentriques. Pour les premières, le sujet estime verbalement la distance entre deux objets ou la taille d'un objet tandis que pour les distances égocentriques, il estime la distance entre sa position et une cible avec la tâche de lancer (voir chapitre 4).

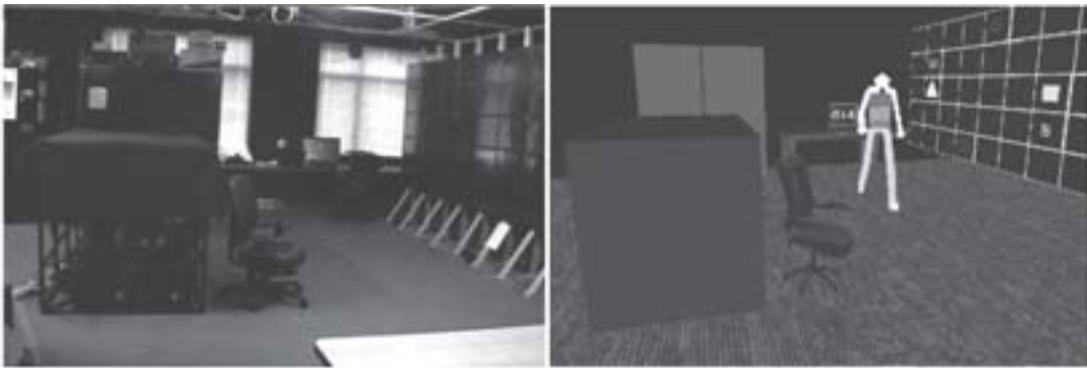


FIGURE 2.27: De gauche à droite : salle réelle de l'expérimentation et la scène virtuelle correspondante avec un avatar. Image tirée de [RWCB12].

L'effet des avatars est différent pour les distances égocentriques et exocentriques. Les distances exocentriques sont moins sous estimées et similaires aux estimations en environnement réel avec l'avatar statique et l'avatar dynamique. Cependant, la sous estimation est plus importante avec l'absence d'avatar dans la salle virtuelle ou la présence des deux avatars ou d'un seul avatar animé.

Concernant les distances égocentriques, les estimations sont plus précises dans l'environnement réel et avec l'avatar dynamique et les deux avatars. Toutefois, lorsque la scène virtuelle est vide ou contient l'avatar statique ou l'avatar animé, l'erreur est presque le double. Concernant l'effet des deux avatars sur les distances égocentriques et exocentriques, le résultat montre que probablement le déplacement de ces avatars dans une scène statique ne permet pas de comprendre l'échelle pour l'estimation des distances exocentriques. Cependant, cette condition améliore la perception des distances égocentriques. Par conséquent, ce résultat reste flou et nécessite plus d'investigation.

De ces travaux, nous pouvons conclure que l'ajout d'avatars améliore la perception des distances en EV. Cependant il est préférable d'utiliser soit des avatars statiques, soit des avatars dynamiques reproduisant de manière fidèle les mouvements de l'utilisateur pour une meilleure amélioration.

2.3.3 Le champ de vision

Pour palier au problème du champ de vision restreint les solutions se divisent en 2 idées : élargir le champ de vision offert par le dispositif d'affichage et élargir le champ de vision offert par le rendu.

Champ de vision physique

De multiples travaux proposent de nouveaux dispositifs d'affichage offrant de larges champs de vision. La plupart se sont intéressés au champ de vision horizontal.

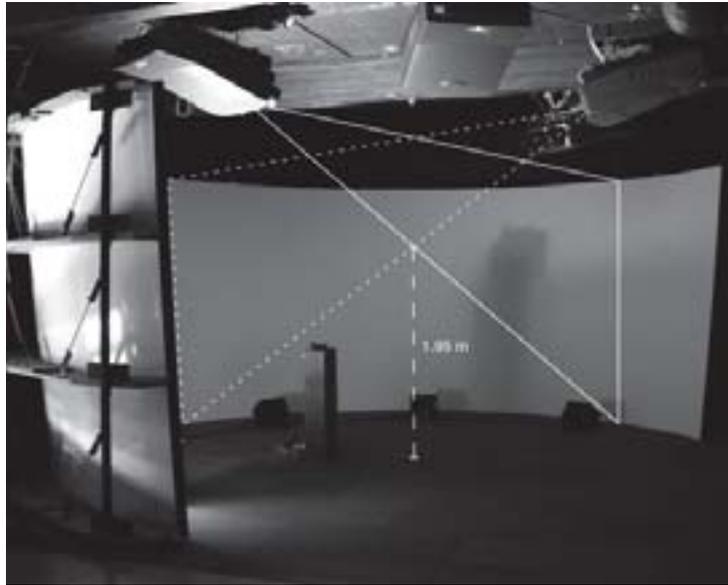


FIGURE 2.28: Le i-Cone : écran semi-sphérique avec quatre projecteurs. Image tirée de [THIT04].

Simon et Gobel [SG02] ont proposé le i-Cone, un nouveau dispositif d'affichage sous une forme conique avec une inclinaison de 5° pour augmenter le champ de vision horizontal à 240° . Le dispositif utilise un système de projection basé sur un affichage panoramique réalisé à l'aide de quatre vidéo projecteurs couvrant toute la largeur de l'écran. Ce nouveau dispositif d'affichage offre un champ de vision horizontal élargi, toutefois le champ de vision vertical reste limité et des améliorations sont envisagées pour rajouter une projection sur le sol.

Le TWISTER III est un nouveau dispositif d'affichage offrant un champ de vision horizontal de 360° et vertical de 64° [THIT04]. L'objectif de ce système est de proposer une vision auto-stéréoscopique sur 360° . La vision auto-stéréoscopique est le principe permettant une vision stéréoscopique (généré pas le système) sans l'obligation de porter des lunettes 3D. Le système d'affichage repose sur un nouveau système de projection formé de matrices verticales de LEDs placées sur un support cylindrique, comme le montre la figure 2.29. Ce système forme un environnement cylindrique où une seule personne peut être immergée. Lorsqu'une personne est à l'intérieur de l'environnement, le système de projection commence à tourner dans une direction prédéfinie. Les matrices de LEDs projettent les pixels formant une image sur 360° et permettant une vision auto-stéréoscopique. Cette dernière est générée grâce au système de LEDs. En effet, une barrière fine (figure 2.29 : parallax barrier) est placée en face des deux matrices de LED de telle sorte que la lumière projetée par chaque matrice est séparée et est visible uniquement par l'œil se trouvant sur le même côté. La limite de ce système est qu'il permet uniquement de projeter des images animées et non pas des scènes virtuelles où l'utilisateur peut interagir par la navigation ou la manipulation. La figure montre un utilisateur immergé dans le TWISTER, la scène virtuelle correspond à un environnement extérieur affiché à partir d'images fixes

Ardouin *et al.* [ALM⁺12] ont développé un nouveau prototype de dispositif d'affichage : le *FlyViz*, comme le montre la figure 2.31. Ce dispositif d'affichage se compose d'un HMD combiné avec un système

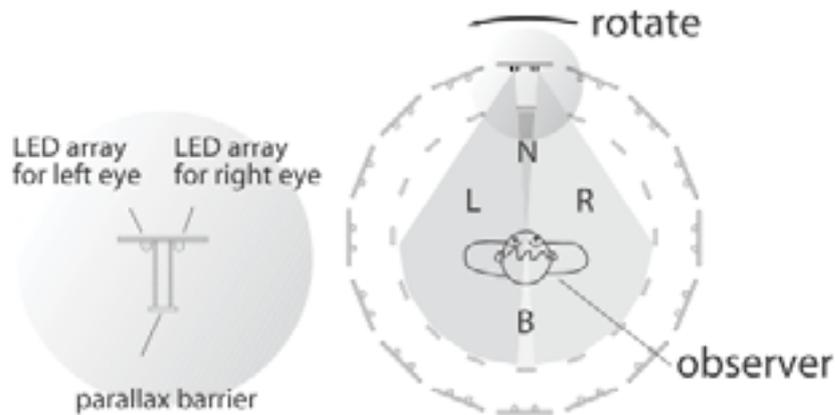


FIGURE 2.29: Le Twister : le principe de la vision auto-stéréoscopique basé sur les matrices de LEDs. Image tirée de [THIT04].

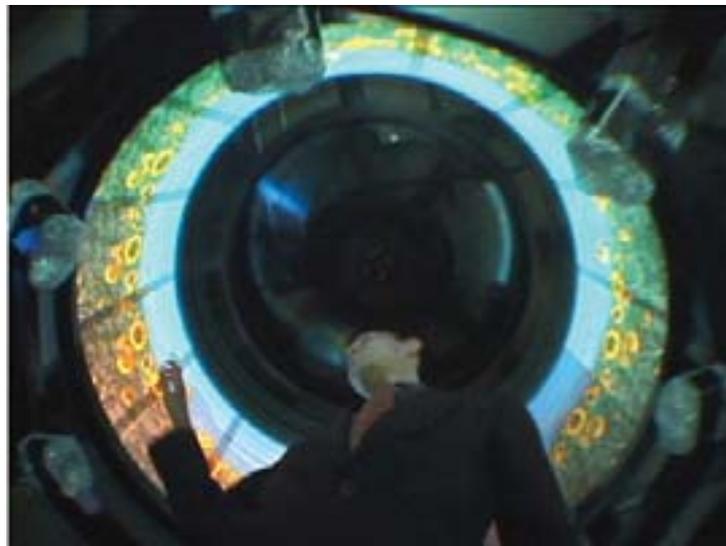


FIGURE 2.30: Utilisateur immergé dans le Twister III. Image tirée de [THIT04].

d'acquisition d'images et offre un affichage temps réel de la scène qui entoure l'utilisateur avec un champ de vision de $360^\circ \times 80^\circ$ sans vision stéréoscopique. Le système traite les images omnidirectionnelles de l'environnement réel, obtenues par la caméra panoramique, pour créer une image sur 360° et la projeter sur le l'écran du HMD.

Technique de rendu

Les solutions technologiques pour augmenter le champ de vision s'avèrent généralement coûteuses. D'autres travaux ont recours aux techniques de projection pour élargir le champ de vision avec les dispositifs d'affichage classiques comme les CAVEs et les HMDs.

Petkov *et al.* [PPZ⁺12] proposent une approche de visualisation permettant de visualiser une scène virtuelle de 360° sur des dispositifs d'affichage arbitraires offrant un champ de vision physique de moins de 360° comme les CAVEs à 3, 4 ou 5 écrans. Son principe est basé sur la cartographie conforme permettant de modifier la géométrie de la scène pour l'adapter à la taille du dispositif d'affichage. La cartographie conforme offre l'avantage de préserver les angles et conduit à préserver localement les formes.



FIGURE 2.31: Le prototype du FlyViz : casque combinant un HMD et un système d’acquisition d’image. Image tirée de [ALM⁺12].

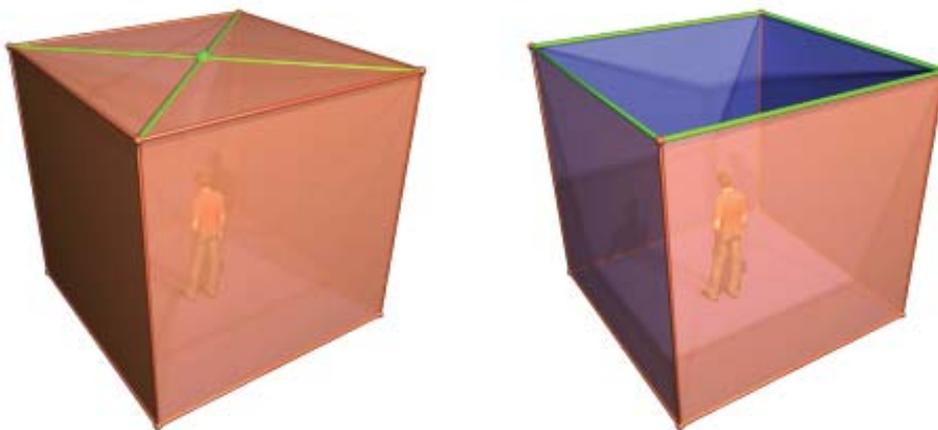


FIGURE 2.32: Modèle de maillage pour un CAVE avec 5 écrans. Le cube gauche représente la coupe sur le maillage source. Cube droit représente le maillage cible. Image tirée de [PPZ⁺12].

Ce processus de rendu se divise en plusieurs phases. 1) *Le modèle de maillage* : à ce niveau un modèle de maillage est défini, comme illustré sur la figure 2.32. Sur le modèle de maillage source sont définies les limites et les coupes à effectuer. Les deux maillages sources et cibles sont paramétrés avec des points de références dont la projection sur les murs (présentée comme sphères vertes) définit les points d’intersection de la coupe sur le maillage source. 2) *Le traitement du maillage* : à ce niveau le maillage source est découpé en suivant l’algorithme de Riemann et mappé sur une sphère. Ensuite, la cartographie conforme sur le disque unitaire est calculée en utilisant l’algorithme du flot de Ricci, comme illustré sur la figure 2.33. À cette étape, les coordonnées UV sont stockées dans les sommets des deux maillages. En se basant sur les shaders, les coordonnées de texture sont calculées à partir du maillage source et mappées sur le disque unitaire. Enfin, à partir de ce dernier les textures sont mappées au maillage cible. 3) *La*

génération de la cube-map : en utilisant les shaders, le maillage est par la suite projeté sur les faces de la cube-map. L'étape finale correspond au rendu final à partir de la cube-map en utilisant le principe de rasterisation ou le ray-tracing.

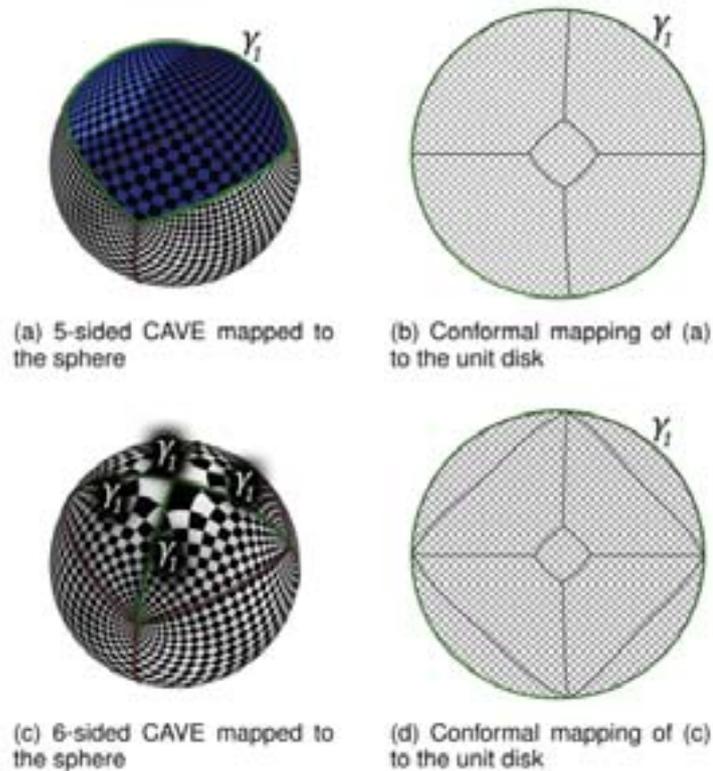


FIGURE 2.33: L'algorithme de la cartographie conforme entre un CAVE à 5 écrans et un CAVE à 6 écrans. Image tirée de [PPZ⁺12].



FIGURE 2.34: Image panoramique formées de trois images. Image tirée de [HKL07].

Hu *et al.* [HKL07] ont développé une méthode permettant de créer et de projeter une image panoramique dans un EV en temps réel. Pour ce faire, plusieurs caméras couvrant une scène de 360° capturent des images, ces dernières sont traitées pour former une image panoramique. Dans un premier temps, les

images capturées sont traitées pour éliminer les distorsions engendrées par la caméra, comme le montre la figure. Une projection cylindrique est ensuite appliquée sur chaque image pour obtenir de nouvelles images. Dans un deuxième temps, ces images sont alignées deux à deux en se basant sur les points de correspondances définis manuellement. La dernière étape consiste à éliminer et aligner les zones qui se chevauchent entre deux images pour former une seule image panoramique (figure 2.34)

2.4 Facteurs identifiés et retenus pour nos expérimentations

En se basant sur l'état de l'art présenté, nous avons identifié plusieurs facteurs importants dans notre outil de revue de projet. Nous avons étudié des facteurs des trois catégories présentées : les facteurs techniques, les facteurs compositionnels et les facteurs humains.

2.4.1 Facteurs de l'expérimentation I

Sous les facteurs compositionnels, nous avons vu le facteur du réalisme qui traite la qualité du rendu. Dans notre contexte il n'est pas possible d'utiliser le rendu photo réaliste car les maisons à visiter ne sont pas encore construites. Toutefois, les indices de l'échelle jouent un rôle important dans notre contexte. En effet, les meubles dans les maisons représentent un indice de l'échelle qui influence l'estimation des distances, comme l'ont prouvé les travaux précédents [Sim14, VCOH14]. Par ailleurs, la modélisation des meubles et l'ameublement des maisons virtuelles nécessitent un temps de réalisation. Toutefois, il se peut que le style d'ameublement ne soit pas au goût de tout le monde et peut donc influencer la prise de décision des clients. Le risque est qu'ils jugent le plan de la maison en s'appuyant sur le design intérieur utilisé, plutôt que sur les dimensions effectives des différentes pièces. Pour ces raisons, nous avons décidé d'étudier le **facteur d'ameublement** dans la première expérimentation.

Dans les maisons, les dimensions des murs et la taille des pièces sont variées entre les petites pièces comme les toilettes et les grandes pièces comme le séjour. Dans ce contexte, le client doit juger la taille de toutes ces pièces pour le choix du plan de sa maison. Pour cette raison, nous n'avons pas étudié l'influence de l'intervalle de distance car ce facteur ne représente pas un paramètre modifiable dans notre contexte.

Pour visiter les maisons, le client doit explorer la scène virtuelle en se déplaçant dans les différentes pièces, pour plusieurs raisons que nous présentons dans le chapitre 3, section 3.2.3, le déplacement est effectué avec une navigation passive à l'aide d'une wimote. D'après les travaux de Campos *et al.* [CBB12], lorsque le déplacement se fait avec une navigation passive les personnes s'appuient sur les indices visuels plus que les indices vestibulaires dans l'estimation des distances. Lors de la navigation passive, la personne en déplacement voit les objets se déplacer et bouger dans le sens inverse de la navigation, ce phénomène est appelé le flux optique. Le déplacement des objets dépend de leur position par rapport à la personne en déplacement (loin ou proche). La vitesse de déplacement des objets en fonction de leur position dans la scène virtuelle représente un indice visuel aidant dans l'estimation des distances. Cette vitesse dépend de la vitesse de navigation en environnement virtuel.

Par ailleurs, la vitesse de navigation est mal perçue en environnement virtuel. En effet, Palmissani *et al.* [Pal02] ont trouvé que la vitesse est perçue comme plus rapide. Pour toutes ces raisons nous sommes intéressés au facteur de **la vitesse** en étudiant plusieurs variantes de vitesse afin de choisir la vitesse la plus appropriée pour l'outil de revue de projet.

Dans la catégorie des facteurs humains, nous avons présenté les facteurs de l'âge, du sexe et le style d'apprentissage mais d'autres facteurs existent comme la différence entre les individus dans la pratique et l'expérience avec les environnements virtuels. Ces facteurs ont déjà été le sujet de plusieurs travaux résumés dans [RVH13]. A notre connaissance aucune étude ne s'est intéressée à étudier l'influence du style d'apprentissage sur l'estimation des distances en environnement virtuel. Ce style d'apprentissage peut correspondre au profil cognitif **VAK** identifié par le questionnaire standard **VAK** [CC05]. Le travail que nous avons présenté dans l'état de l'art traite l'influence du profil cognitif **VAK** sur l'interaction avec l'environnement virtuel dans le contexte de l'apprentissage géométrique. Pour cette raison, nous avons décidé d'étudier son influence dans l'estimation des distances.

2.4.2 Facteur de l'expérimentation II

Comme nous l'avons vu dans les facteurs techniques, le champ de vision influence l'estimation des distances. D'après les travaux cités, la majorité se sont focalisés sur le champ de vision horizontal. Dans nos expérimentations nous avons utilisé un mur immersif offrant un champ de vision horizontal de 90° et vertical de 71° sans la projection sur le sol. D'après le travail de Wu *et al.* [WOH04], le champ de vision vertical influence l'estimation des distances. Par ailleurs, la visibilité du sol proche qui entoure l'utilisateur influence l'estimation des distances. Toutefois, avec le mur immersif que nous avons utilisé le sol proche de la scène virtuelle n'est pas projeté ni sur le sol ni sur l'écran. En conséquence, nous avons trouvé que c'est important dans notre contexte d'étudier l'influence du **champ de vision vertical** sur l'estimation des distances. En se basant sur les travaux précédent concernant l'amélioration du champ de vision [PPZ⁺12], nous avons proposé une projection hybride permettant d'élargir le champ de vision vertical.

2.4.3 Facteurs de l'expérimentation III

Concernant la vision stéréoscopique et le suivi de la tête, nous avons remarqué une différence entre les résultats obtenus. En effet, Grechkin *et al.* [GNP⁺10] ont trouvé des sous estimations des distances similaires avec ou sans les 2 facteurs en utilisant un HMD avec stéréoscopie et avec suivi de la tête et un LSID sans stéréoscopie et sans suivi de la tête. Par ailleurs, dans une autre étude, Riecke *et al.* [RBS09] ont trouvé des estimations précises en utilisant un HMD et un petit écran sans stéréoscopie et sans suivi de la tête. En raison de la variabilité des résultats nous avons étudié l'influence de **la stéréoscopie et le suivi de la tête** dans notre contexte.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe et les bases de la perception des distances. Ensuite, nous avons abordé la problématique de la perception des distances dans les environnements virtuel et réel. Des études nombreuses et variées existent dans la littérature mais la problématique de la perception des distances en EV reste une question ouverte. Nous avons présenté une grande partie des facteurs influençant la perception des distances en EV, d'autres facteurs non abordés dans ce rapport existent encore, comme la hauteur des yeux, l'angle d'inclinaison, l'éclairage, etc. Nous avons présenté les différents facteurs en suivant les quatre catégories proposées par Renner *et al.* [RVH13] qui divisent les différents facteurs de manière pragmatique. Toutefois, selon notre point de vue, nous avons apporté des modifications dans la classification de certains facteurs comme la qualité du rendu que nous avons déplacé des facteurs

techniques aux facteurs compositionnels d'autant que les différents travaux présentés étudient la qualité du rendu du côté de l'aspect visuel de la scène et non pas du côté des caractéristiques techniques des cartes graphiques.

D'après les différentes expérimentations présentées nous pouvons remarquer que les facteurs liés à la perception des distances sont parfois complémentaires. Par exemple, lorsque le champ de vision est restreint, l'utilisation d'une scène virtuelle réaliste reproduite à partir de photos réalistes permet de fournir des informations supplémentaires complétant celles fournies par le champ de vision restreint et par conséquent conduisant à une perception précise des distances [RBS09].

Cette multiplicité des études représente à la fois un avantage, permettant d'identifier les facteurs potentiels influant la perception des distances et un inconvénient, car ces diverses études sont différentes sur plusieurs aspects techniques, compositionnels, etc. Malgré la variété des études, nous pouvons constater que la généralisation des résultats reste impossible, d'autant que les expérimentations sont très variables entre les différentes études que se soit au niveau des dispositifs d'affichage ou au niveau du contexte expérimental. Ces résultats peuvent servir de base pour d'autres expérimentations similaires. Par conséquent, un réglage fin de l'outil de RV est recommandé en fonction du contexte et de la tâche [Zik07].

À l'issue du chapitre nous avons présenté quelques améliorations proposées pour résoudre la problématique de la perception des distances en EV que nous avons regroupé par facteur étudié : 1) *la correction des estimations*, 2) *les avatars*, 3) *le champ de vision*. Les différentes idées n'étaient pas toutes efficaces comme l'intégration d'un avatar dynamique dans une scène non réaliste [PRKI10] où les distances étaient sous estimées. Par ailleurs, ces améliorations ne sont pas souvent faisables, par exemple les corrections implicites en marchant physiquement la distance les yeux ouverts en EV ne sont pas adaptées aux murs immersifs. En outre, l'augmentation du champ de vision physique est une solution un peu coûteuse et son efficacité sur l'estimation des distances doit être étudiée au préalable. De même, pour les techniques de rendu que nous avons proposées, ces dernières ont été proposées avec un principe minimisant les distorsions au niveau de l'affichage mais nécessite une évaluation sur l'estimation des distances.

Dans le cadre de notre travail, nous avons visé à améliorer la perception des distances dans le contexte d'utilisation de la revue de projet architectural. Afin d'étudier l'influence des facteurs que nous avons identifiés sur l'estimation des distances dans ce contexte, nous avons conçu un outil de revue de projet architectural que nous avons évalué par la suite en étudiant notamment les facteurs concernant 1) Le profil cognitif des utilisateurs, 2) l'ameublement des maisons, 3) la vitesse de navigation, 4) le champ de vision et 5) la stéréoscopie et le suivi de la tête. La deuxième partie sera consacrée à la présentation du processus de conception et d'évaluation de l'outil de revue de projet architectural.

Deuxième partie

Conception et évaluation de l'outil de revue de projet architectural en environnement virtuel

Conception de l’outil de revue de projet

Sommaire

3.1	Modèle de référence de l’immersion et de l’interaction	76
3.2	Conception de l’outil de revue de projet architectural CIMBEES	77
3.2.1	Niveau fonctionnel : identification des besoins	77
3.2.2	Niveau physique : interfaces sensorielles et motrices	79
3.2.3	Niveau cognitif : métaphores d’interaction	80
3.3	La conception des maquettes numériques	81
3.3.1	Modélisation de maquettes numériques	81
3.3.2	Export des maquettes numériques	83
3.4	Conclusion	84

Dans le processus de conception des applications de RV nous pouvons distinguer la phase de conception et la phase d’évaluation. Ce processus adopte généralement une démarche centrée sur l’utilisateur. Dans ce cas, le développement commence par la définition des besoins de l’utilisateur. La compréhension de la fonctionnalité finale de l’outil est nécessaire dans la phase de conception afin de procurer un outil qui réponde aux attentes de l’utilisateur final. Puis, la phase d’évaluation vérifie l’efficacité et s’assure que tous les besoins sont pris en compte. Ce processus est itératif. En effet, si des manques ou des problèmes sont rencontrés dans la phase d’évaluation, le concepteur améliore l’outil autant de fois que nécessaire. Dans cette partie, nous présentons le développement de notre outil de revue de projet architectural selon ces deux phases.

Dans ce chapitre, dans un premier temps nous présentons le modèle de référence pour la conception des applications en EV défini dans le volume 1, *L’homme et l’environnement virtuel* du traité de la réalité virtuelle [FMA⁺06]. Dans un deuxième temps, nous verrons les étapes de la conception de notre outil de revue de projet architectural et les différentes tâches définies pour l’outil.

3.1 Modèle de référence de l'immersion et de l'interaction

Les outils de réalité virtuelle sont destinés à être utilisés par l'homme pour un objectif spécifique. Il est nécessaire d'analyser et d'étudier finement les besoins de l'utilisateur final afin de concevoir un outil efficace qui répond aux exigences de la fonctionnalité finale. Cette tâche correspond aux processus d'interfaçage, tel que défini dans le volume 1, *L'homme et l'environnement virtuel* du traité de la réalité virtuelle. Ce processus, dans le cycle de conception fournit un socle préalable nécessaire pour aborder le développement d'applications de réalité virtuelle selon une approche centrée-utilisateur.

Ce processus, pour qu'il soit complet, a été divisé en trois niveaux d'immersion et d'interaction. Le choix de ces deux dernières a été fait par rapport à la définition de la réalité virtuelle dans laquelle ces deux tâches constituent les bases fondamentales de la réalité virtuelle. Les trois niveaux représentent 1) le niveau physique ou sensori-moteur, 2) le niveau cognitif et 3) le niveau fonctionnel.

Nous commencerons d'abord par le niveau fonctionnel (**niveau 3**) qui constitue le niveau fondamental et le point de départ à partir duquel le concepteur de l'application doit commencer. Dans ce niveau, il doit se poser des questions sur les activités et les tâches que l'utilisateur devra réaliser à l'aide de l'application, compte tenu que les outils de réalité virtuelle sont développés, non seulement pour immerger l'utilisateur dans un monde artificiel, mais également pour réaliser une activité donnée.

Le niveau physique ou le niveau sensori-moteur (**niveau 1**) du modèle de référence a été défini comme le niveau physique qui relie l'ordinateur et l'utilisateur par l'intermédiaire des interfaces comportementales : sensorielles, motrices et sensori-motrices.

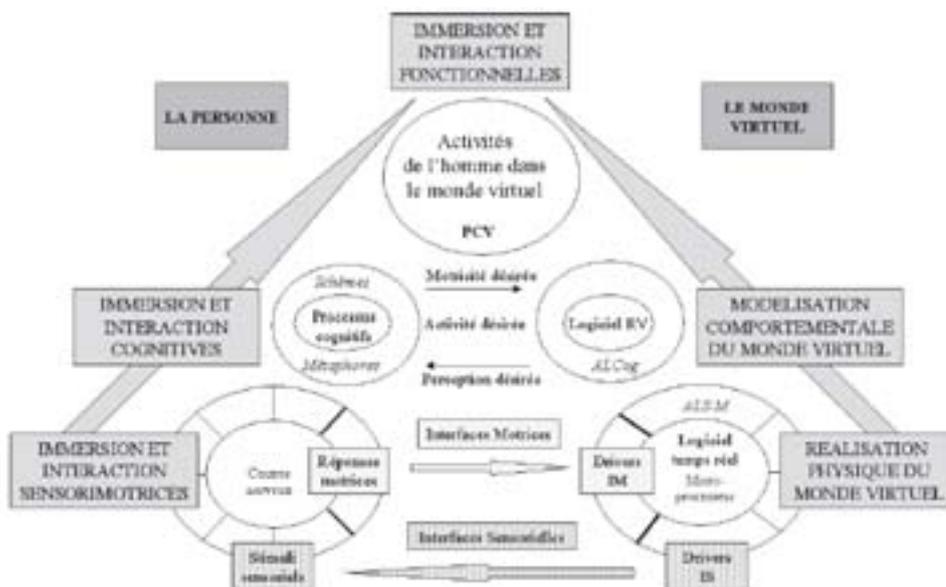


FIGURE 3.1: Schéma technocentrique de référence pour l'immersion et l'interaction en réalité virtuelle tel que défini dans [FMA⁺06].

Au niveau cognitif (**niveau 2**) il est nécessaire d'analyser le processus cognitif que le sujet va utiliser pour interagir avec l'EV afin de réaliser les activités qui lui seront demandées. Cette approche est basée sur l'analyse de l'activité du sujet, non seulement sur l'interfaçage au niveau physique (bouton de commande), mais aussi sur les processus mentaux qui seront utilisés par la personne pour penser et réagir. Dans ce niveau il faudra définir quelles sont les catégories de processus cognitifs qui seront impliquées pour avoir

une interaction et une immersion efficace et relativement naturelle. En d'autres termes, lors de l'interaction avec l'EV parfois il est possible de se comporter ou d'agir comme dans le monde réel, par exemple, lorsque l'utilisateur navigue en EV en marchant physiquement, dans le cas des HMDs. Dans ce cas, nous parlons du processus cognitif « Schèmes Comportementaux Importés (SCI) ». Dans cette catégorie les utilisateurs reproduisent des comportements déjà acquis dans le monde réel. En cas de contrainte technique, économique ou autre, la reproduction du comportement naturel en EV n'est pas possible, la solution éventuelle est de contourner ces difficultés en employant une « métaphore d'interaction ». Par exemple, lorsque l'outil de RV utilise un mur immersif comme dispositif d'affichage, l'utilisateur ne peut pas marcher physiquement pour se déplacer dans l'EV. Dans ce cas, on peut lui proposer une navigation à l'aide d'un périphérique d'interaction. Ainsi, il peut se déplacer en appuyant sur les boutons. Cette action ne correspond pas à l'action sensori-motrice d'un déplacement naturel mais permet de réaliser la tâche en EV.

Ces trois niveaux que nous venons de voir ont été défini comme le modèle de référence pour l'immersion et l'interaction. Il illustre la démarche à suivre pour la conception des applications de RV. Ce modèle est résumé dans la figure 3.1. En ce qui concerne le niveau fonctionnel, dans toutes les applications de RV, les activités sont décomposables en quelques comportements de base appelés les « Primitives Comportementales Virtuelles ». Ces dernières peuvent être regroupées en quatre catégories :

- observer le monde virtuel,
- se déplacer dans le monde virtuel,
- agir sur le monde virtuel,
- communiquer avec autrui ou l'application.

Dans ce qui suit nous abordons la phase de conception de l'outil de revue de projet dans le cadre du projet CIMBEES. Nous nous basons sur le modèle de référence pour l'immersion et l'interaction. Nous décrivons les besoins identifiés, les moyens d'interaction utilisés et les techniques d'interaction définies.

3.2 Conception de l'outil de revue de projet architectural CIMBEES

Dans le développement de notre outil de revue de projet nous avons suivi le modèle de référence pour l'immersion et l'interaction [FMA⁺06] que nous venons de voir. Dans le niveau fonctionnel (niveau 3) nous avons défini les différentes fonctionnalités de l'outil de revue de projet et les tâches à réaliser en fonction des besoins des différents partenaires du projet que nous avons identifiées lors de plusieurs réunions du projet. À partir de ces besoins dans le niveau physique, nous avons choisi parmi les équipements disponibles dans notre laboratoire de recherche, les moyens d'interaction (dispositif d'affichage et périphérique d'interaction) les plus adaptés aux besoins. À l'issue de ces deux étapes, dans le niveau cognitif, nous avons défini les interactions nécessaires à la réalisation des tâches.

3.2.1 Niveau fonctionnel : identification des besoins

Comme nous l'avons dit, nous devons commencer par le niveau fonctionnel (niveau 3) du modèle de référence pour l'immersion et l'interaction car c'est le niveau fondamental pour traiter les deux autres niveaux du modèle. Dans le cadre du projet CIMBEES, nous distinguons deux intérêts à l'outil de RV : la commercialisation et la réalisation de revue de projet. Au début du processus d'achat/vente une

visite virtuelle est effectuée entre l'architecte et le client dans un objectif de commercialisation. En effet, l'architecte rencontre le client une première fois pour discuter de ses besoins (type de maison, taille, budget, etc.). À la suite, il lui propose une visite virtuelle d'un premier modèle proche de ses besoins. Lors de cette première visite, le client aura une idée de la configuration (nombre de pièces, agencement, etc.) et du volume global de sa future maison. Une fois que le client aura signé un précontrat, l'architecte réalise des variantes de maquette numérique et planifie une revue avec le client. Lors de cette revue le client effectue une visite virtuelle des différentes maisons et effectue des choix concernant sa future maison. Une fois satisfait de la maquette, il signe le contrat avec l'architecte pour la construction de la maison. Après la vente, l'architecte peut proposer une nouvelle revue pour suggérer au client des modifications ou des améliorations esthétiques sur la maison avant sa construction.

Visite virtuelle de commercialisation et de revue de projet

L'outil de RV visant avant tout l'aide à la décision, il permet à l'architecte d'expliquer et d'accompagner le client dans ses choix par des mises en situation explicites dans les visites virtuelles. La revue de projet se déroule d'une manière formelle, les points à aborder sont fixés par les architectes en amont. Cette méthode permet d'une part, l'identification des fonctionnalités que l'outil de RV doit fournir, d'autre part, elle permet de réaliser une revue efficace en abordant tous les points essentiels et réduit le temps de la revue. Dans le projet CIMBEES, les architectes utilisent l'outil de RV pour discuter des aspects concernant l'habitabilité, le confort de vie et la configuration du plan de la maison. Les différents points à évaluer sont :

- la taille des différentes pièces de la maison,
- l'emplacement et la taille des ouvertures (fenêtres et portes),
- l'agencement des pièces,
- l'évolutivité du plan aux cours du temps (supprimer, rajouter ou agrandir une pièce dans le futur),
- le choix des matériaux en fonction du budget client.

Concernant le choix des matériaux, ce point peut être abordé mais sans visualisation des matériaux en temps réel. Cette tâche a été exclue des fonctionnalités de l'outil car elle nécessite la simulation de caractéristiques physiques complexes (niveau d'isolation sonore et thermique en fonction des matériaux) et l'utilisation de dispositifs spécifiques pour le retour de ressentis.

Les autres points se basent principalement sur l'immersion en EV puisque le client doit observer le modèle et prendre des décisions. L'évaluation liée à la taille, que ce soit pour les pièces ou les ouvertures, se base principalement sur l'estimation des distances, élément abordé dans le chapitre précédent. Concernant l'évaluation de l'agencement des pièces et l'évolutivité du plan, l'utilisateur doit explorer la maquette numérique et se déplacer pour comprendre l'agencement des différentes pièces et estimer l'espace. En résumé, les besoins des visites virtuelles de maison sont :

- l'observation,
- l'exploration,
- la compréhension,
- l'immersion de plusieurs personnes.

À partir des besoins identifiés, les fonctionnalités de l'outil couvrent l'immersion collaborative et la navigation. Dans le niveau sensori-moteur (**niveau 1**) nous définissons les moyens d'interaction pour notre outil.

3.2.2 Niveau physique : interfaces sensorielles et motrices

Dans cette sous section, nous traitons le niveau physique (niveau 1) pour définir les interfaces sensorielles et motrices pour notre outil. Selon les besoins identifiés précédemment, les différentes interactions lors des visites virtuelles peuvent se résumer à l'immersion collaborative et la navigation. La revue de projet est une revue collaborative qui requiert de manière générale la présence de plusieurs participants dans l'EV, les CAVEs sont des dispositifs d'affichage adaptés aux revues de projet car ils offrent un espace collaboratif permettant l'immersion de plusieurs personnes. Toutefois, dans le cadre de notre projet le coût de ce dispositif s'avérait élevé d'autant que deux de nos collaborateurs (les architectes et le fabricant des maisons) étaient géographiquement distants et pensaient chacun à installer une plateforme de RV. Par ailleurs, les HMDs sont des dispositifs d'affichage moins coûteux permettant une immersion totale de l'utilisateur et permettent aussi d'immerger plusieurs participants dans la même scène virtuelle à l'aide de plusieurs HMDs connectés ensemble. Cependant, la revue de projet sera effectuée avec des clients ayant différents âges et l'utilisation des HMDs n'est pas forcément une solution convenable pour tous les clients. En outre, le poids des HMDs peut être dérangerant notamment si le client reste immergé une durée un peu longue dans le cas où il visite plusieurs variantes du plan. Dans ce cas, il est possible de faire des pauses entre les visites. En revanche, cette solution nécessite la disponibilité du client et de l'architecte, ce qui n'est pas toujours évident. Les écrans télé 3D sont des dispositifs d'affichage collaboratifs mais généralement possèdent un champ de vision restreint par rapport aux murs immersifs. Ceci aussi est le cas pour les plans de travail virtuels immersifs (Workbench) qui offrent un champ de vision horizontal plus restreint que les murs immersifs.

Partant de ce constat les collaborateurs du projet CIMBEES ont choisi l'utilisation d'un mur immersif comme dispositif d'affichage.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé la plateforme de réalité virtuelle *IN VIRTUO* du laboratoire ICube [ICu]. Cette plateforme est constituée de trois systèmes de visualisation : un plan de travail virtuel immersif (Workbench), un mur immersif et un écran de télévision 3D, comme illustré dans la figure 3.2. Les deux premiers dispositifs d'affichage possèdent des écrans à stéréoscopie active et un système de capture des mouvements de l'utilisateur. L'écran de télévision 3D dispose d'une webcam pour le suivi des mouvements. Pour toutes les raisons citées ci-dessus, et conformément au choix des autres collaborateurs du projet, nous avons effectué toutes nos expérimentations avec le mur immersif car il permet d'immerger plusieurs personnes dans un espace plus grand que les deux autres dispositifs, en outre il fournit un champ de vision plus large.

Pour interagir dans l'EV, la plateforme *IN VIRTUO* dispose de périphériques d'interaction, un *flystick*, une *Wimote* et des gants de données, illustrés dans la figure 3.3. Un *flystick* et une *Wimote* de Nintendo sont deux périphériques dotés de boutons. Les gants de données sont des gants pouvant détecter et mesurer les flexions et les contacts des doigts. Tous ces périphériques sont détectables par le système de capture de mouvement grâce aux réflecteurs infrarouge associés. Le système de capture de mouvement capte ainsi les positions et les orientations des mains de l'utilisateur.

Pour notre outil de revue de projet, l'interaction principale est la navigation. Des techniques de navigation basées sur le mouvement des mains existent [CMRCL09]. Toutefois, ceci nécessite un entraînement et peut être non adapté à des personnes âgées sans aucune expérience avec les outils 3D. L'utilisation d'une navigation à l'aide des boutons nous a semblé plus convenable au contexte de revue de projet dans le processus achat/vente. Puisque les gants de données ne sont pas adaptés à cette technique de navigation,



FIGURE 3.2: Les dispositifs d’affichage de la plateforme de réalité virtuelle *IN VIRTUO*. Image de gauche représente le Workbench. Image de droite représente le mur immersif

à l’aide des boutons, nous avons écarté son utilisation.

Les utilisateurs finaux peuvent être, soit des personnes âgées ou des personnes novices sans aucune expérience préalable avec les outils 3D, soit des personnes déjà familières avec les jeux vidéo 3D. Nous avons donc retenu la *Wii* de Nintendo pour la navigation dans l’EV pour cette dernière raison et pour le fait que sa prise en main est également aisée pour des personnes non inexpérimentées.

Dans le cadre de notre travail, nous utiliserons donc le mur immersif pour le dispositif d’affichage et la *Wii* de Nintendo pour l’interaction.



FIGURE 3.3: Les périphériques d’interaction de la plateforme de réalité virtuelle *IN VIRTUO*. De gauche à droite : le flystick, la *Wii* et les gants de données.

3.2.3 Niveau cognitif : métaphores d’interaction

Le niveau qui reste à définir dans notre conception est le niveau cognitif (**niveau 2**), le centre du modèle de référence pour l’immersion et l’interaction. Pour définir le comportement de l’utilisateur, nous devons prendre en considération les deux niveaux précédents : les besoins et les moyens d’interaction. En plus du besoin d’immerger les utilisateurs pour observer et voir la maquette numérique, ces derniers doivent se déplacer dans la maison pour effectuer la visite virtuelle de manière semblable à une visite réelle. Cette action nécessite une technique de navigation qui soit adaptée à nos moyens d’interaction, présentés précédemment.

En RV la navigation se fait généralement selon deux méthodes, soit une navigation active avec la marche physique, soit une navigation passive avec un périphérique d’interaction. La marche physique, nécessitant un grand espace de déplacement, est spécifiquement utilisée avec les HMDs. La navigation

passive est adaptée à tout environnement et dispositif d’affichage. Pour cette raison, nous avons opté pour une navigation passive à l’aide de la *Wiimote*.

3.3 La conception des maquettes numériques

L’outil de RV doit disposer des maquettes numériques comme support pour réaliser les visites virtuelles. Ces maquettes numériques, comme déjà présentés dans le chapitre 1, peuvent être conçues, soit avec des outils de CAO et en EV, soit à l’aide uniquement des outils de CAO. Dans le projet CIMBEES, la RV était utilisée uniquement lors de la revue de projet, les maquettes numériques étant modélisées en amont avec des outils classiques de CAO. Ces maquettes numériques sont conformes aux exigences des visites virtuelles en termes de performance d’affichage (temps réel) et offrent un niveau de réalisme suffisant avec un affichage correct des couleurs et de l’éclairage. Dans nos expérimentations, les maquettes numériques sont statiques, aucune modification temps réel n’a été proposée. Nous décrivons ci-après la méthodologie suivie pour obtenir une maquette numérique visualisable en EV.

3.3.1 Modélisation de maquettes numériques

Dans la modélisation des maquettes numériques nous avons utilisé les deux logiciels *Blender* et *3D Studio Max (3ds Max)*. Nous nous sommes basés sur le logiciel *Blender* pour la création des maquettes numériques en partant des plans 2D fournis par les architectes. Puis, nous avons utilisé le logiciel *3ds Max* pour rajouter les textures, les couleurs, les sources de lumière et réaliser le calcul de l’éclairage.

Modélisation de base avec Blender

Pour créer le modèle 3D partant du plan 2D, nous avons créé un calque de base en *Blender* à partir d’une image 2D semi opaque du plan de la maison, comme illustré dans la figure 3.4.



FIGURE 3.4: Étape de la modélisation du modèle 3D à partir du plan 2D avec *Blender*. L’image représente le plan de la maison à l’échelle réelle.

Partant de ce calque nous avons reproduit les parois, les murs intérieurs, les fenêtres et les portes en 2D, représentés par les lignes oranges sur la figure 3.4. Puis à l’aide des commandes de *Blender*,

particulièrement la commande *extrude*, nous avons rajouté la hauteur des murs, comme le montre la figure 3.5. Nous nous sommes basés sur la hauteur standard des murs de 2.5m.

La revue de projet nécessite une maquette numérique à l'échelle réelle. Pour cette raison les calques utilisés sont mis à l'échelle 1 :1. En effet, *Blender* possède des paramètres permettant de préciser l'échelle des modèles.

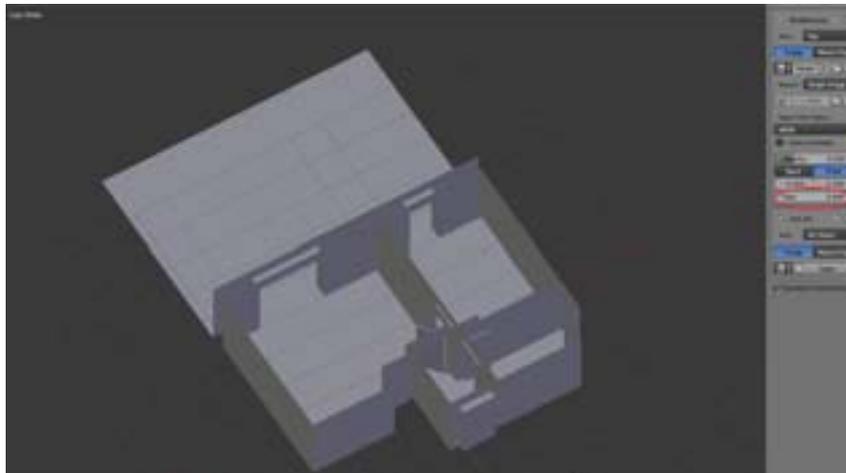


FIGURE 3.5: Modèle 3D de la maison créée avec *Blender*.

Cette échelle est calculée manuellement, à l'aide d'un éditeur d'images comme *Gimp*, nous avons mesuré la largeur totale de la maison (LTP) et la largeur d'une pièce (LPP) en pixel. Puis en se basant sur la largeur de la pièce en mètre (LPM), nous avons calculé l'échelle à l'aide de la règle $\frac{LTP \times LPM}{LPP}$. Nous avons utilisé ce résultat pour préciser l'échelle dans *Blender*.

Ameublement des maisons

Dans nos études expérimentales nous avons utilisé deux catégories de maisons : des maisons meublées et des maisons non meublées. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur les bases de données d'objets 3D existantes sur internet, à partir desquelles nous avons récupéré les meubles et tous les objets que nous avons intégrés dans les maisons. Les maisons meublées sont équipées de meubles et des éléments de bases d'une cuisine et d'une salle de bain (évier, lavabo, douche, etc.) et les maisons non meublées contiennent juste les éléments de base d'une cuisine et d'une salle de bain. Les différents meubles et éléments de bases sont à l'échelle réelle, comme le montre la figure 3.6.

Finition avec 3ds Max

Dans un deuxième temps, nous avons utilisé le logiciel *3ds Max* pour les aspects de rendu. Nous avons défini les sources de lumières à l'intérieur de la maison, une source ponctuelle par pièce, représentée par les sphères jaunes sur la figure 3.7. Puisque les fenêtres des maisons étaient généralement ouvertes, nous avons rajouté une source globale à l'extérieur de la maison représentant le soleil pour simuler la lumière du jour.

Nous avons rajouté des couleurs et des textures simples pour chaque élément de la scène (les murs, le sol, les meubles, etc.). Afin d'éviter la latence lors de la visualisation, nous avons calculé au préalable le rendu final de chaque élément en fonction des sources de lumières et les textures et les couleurs attribuées.



FIGURE 3.6: Modèle d'une maison T3 Meublée que nous avons utilisé dans nos expérimentations.



FIGURE 3.7: Exemple des sources de lumières et des couleurs ajoutées à un modèle avec *3ds Max*.

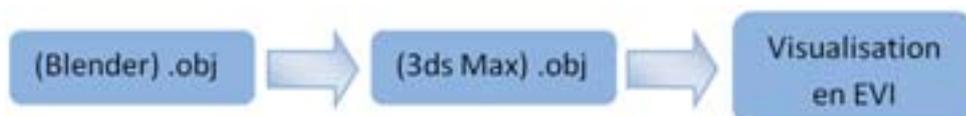
3.3.2 Export des maquettes numériques

Au cours de la modélisation des maquettes numériques nous avons défini le format d'export approprié pour chaque logiciel de telle sorte que le passage d'un logiciel à l'autre se fasse sans perte d'informations au niveau de la qualité des textures et des couleurs.

Au niveau de la modélisation avec *Blender* les modèles sont exportés au format *.obj* qui est supporté pour l'import des données dans *3ds Max*.

À la fin de la conception des modèles avec *3ds Max*, le format de l'export final est différent entre les deux expérimentations effectuées. L'export est réalisé de la manière suivante :

- Expérimentation 1 : les modèles sont exportés au format *.obj*.



- Expérimentation 2 : les modèles sont exportés au format *.fbx* dans *3ds Max* puis, convertis au format *.unity3d* à l'aide du logiciel *Unity*.



3.4 Conclusion

Les outils de revue de projet proposent des interactions variées selon les objectifs définis pour la revue. Pour le développement de ces outils, une conception centrée sur l'utilisateur est plus efficace. Dans notre travail, nous avons suivi le modèle de référence de l'immersion et de l'interaction [FMA⁺06].

À partir de ce modèle, nous avons présenté notre processus de conception de l'outil de revue de projet CIMBEES. Les fonctionnalités de ce dernier ont été identifiées avec les architectes et les partenaires du projet, les tâches se résument principalement à l'immersion collaborative et la navigation dans l'EV. Dans ce travail, nous avons utilisé un mur immersif comme système de visualisation et une *Wimote* de Nintendo que l'utilisateur utilise pour la navigation.

L'outil de revue de projet nécessite un support numérique répondant aux besoins des visites virtuelles qui sont : 1) une performance d'affichage permettant une visualisation et une interaction en temps réel et 2) un niveau de réalisme suffisant permettant une perception correcte des couleurs et de l'éclairage. Nous avons présenté les différentes étapes suivies des différents logiciels et formats d'export utilisés pour l'obtention des maquettes numériques visualisables en EV.

L'outil de revue de projet est principalement utilisé pour la validation de la maquette numérique. Par conséquent, cet outil doit répondre aux fonctionnalités de manière fiable. Une étape d'évaluation est impérative pour s'assurer de l'efficacité des décisions prises en EV. Dans le chapitre suivant nous présentons l'évaluation spécifique à l'outil de revue de projet CIMBEES.

Chapitre 4

Évaluation de l'outil de revue de projet

Sommaire

4.1	Évaluation des outils de réalité virtuelle	86
4.1.1	Méthode d'évaluation de l'utilisabilité	86
4.1.2	Types d'évaluation de l'utilisabilité des outils de réalité virtuelle dans le domaine architectural	88
4.2	Méthodes d'estimation des distances	91
4.2.1	L'estimation verbale	91
4.2.2	Les actions guidées	92
4.2.3	Les correspondances perceptuelles	95
4.2.4	Le temps imaginé de la marche	96
4.2.5	Jugement de faisabilité	97
4.2.6	Bilan	98
4.3	L'évaluation de l'outil de revue de projet CIMBEES	99
4.3.1	Questionnaire de compréhension spatiale (CS)	99
4.3.2	Débriefing semi-guidé	105
4.4	Conclusion	105

L'outil de RV doit être évalué au cours de sa conception car cette évaluation permet d'améliorer le prototype conçu pour fournir un outil fidèle aux besoins définis au début de la phase de conception. Les objectifs d'évaluation peuvent être variés et l'évaluation peut suivre plusieurs méthodes.

Dans ce chapitre, nous abordons dans un premier temps l'évaluation des outils de RV par un aperçu des méthodes d'évaluation. L'objectif n'est pas de présenter un état de l'art détaillé sur l'évaluation des outils de RV mais de lister les différentes méthodes d'évaluation. Nous verrons ensuite les différents types d'évaluation. Dans un second temps, nous présentons notre type d'évaluation qui consiste à évaluer la fiabilité des décisions prises en EV. Ces dernières étant basées principalement sur la perception des distances, nous proposons d'abord une revue des différentes méthodes d'évaluation des distances. Nous expliquons le principe que nous avons suivi pour l'évaluation de l'outil de revue de projet architectural développé dans le cadre du projet CIMBEES. Dans le cadre de cette évaluation, nous avons élaboré un questionnaire spécifique à notre contexte, que nous présentons à la fin de ce chapitre.

4.1 Évaluation des outils de réalité virtuelle

L'évaluation des outils de RV peut porter tant sur l'utilisabilité de l'EV pour la réalisation des tâches, autrement dit, la capacité de l'EV à modéliser les activités demandées, que sur l'efficacité de l'outil pour la réalisation des tâches suggérées. Bowman [BGH02] a défini l'utilisabilité comme à la fois « *la facilité d'utilisation* » et « *l'utilité* » qui caractérisent plusieurs éléments comme la facilité d'apprentissage, la vitesse et la précision de l'exécution des tâches par l'utilisateur, le taux d'erreur de l'utilisateur et la satisfaction (subjective) des utilisateurs.

Nous allons revoir succinctement les méthodes d'évaluation de l'utilisabilité présentées dans [BGH02], puis quelques contextes où l'évaluation de l'utilisabilité a été mise en place.

4.1.1 Méthode d'évaluation de l'utilisabilité

Concernant l'évaluation des outils et des interfaces de RV, quelques études ont tenté d'adapter les méthodes d'évaluation des interfaces utilisateurs graphiques traditionnelles aux applications de RV. D'autres études ont développé des méthodes d'évaluation de l'utilisabilité spécifiques aux applications de RV [BGH02].

Nous pouvons distinguer deux catégories d'évaluations : les méthodes d'évaluation centrée sur l'utilisateur [GHS99], et les méthodes sans utilisateur.

Méthodes centrées sur l'utilisateur

- Évaluation formative : c'est une méthode empirique observationnelle qui évalue l'interaction utilisateur en lui demandant d'effectuer des tâches selon des scénarios afin d'identifier les problèmes d'utilisabilité, aussi bien qu'évaluer la capacité de l'application à supporter les réactions des utilisateurs ainsi que la performance des tâches [WHC15]. Ce type d'évaluation est souvent exploité dans la validation des systèmes d'apprentissage en EV [NH14, WHC15]. Les évaluations formatives peuvent être informelles, c'est-à-dire que les points à évaluer ne sont pas préparés à l'avance et donc l'évaluation s'organise de manière spontanée, en l'occurrence, elle fournit des résultats essentiellement qualitatifs tels que les erreurs remarquées, les commentaires des utilisateurs et les réactions générales. D'autre part, les évaluations formatives peuvent être formelles. Dans ce cas les points à évaluer sont fixés au préalable comme le temps d'exécution de la tâche, le nombre d'erreurs, etc., fournissant des résultats à la fois qualitatifs (observations et remarques) et quantitatifs (les mesures prises).
- Évaluation comparative ou sommative : c'est une évaluation basée sur la comparaison et l'évaluation de deux configurations ou plus du modèle, de composant ou de technique. Dans ce cas l'utilisateur exécute différentes tâches, comme dans l'évaluation formative, mais dans différentes configurations. L'objectif est de déterminer l'efficacité des différentes configurations par rapport à des objectifs prédéfinis afin d'effectuer un choix final [DC03].
- Questionnaire post-hoc : c'est une méthode basée sur des questionnaires que l'utilisateur remplit après l'expérimentation. Les questionnaires sont souvent sur une échelle de Likert, permettant de recueillir des informations subjectives sur les points de vue et les remarques des utilisateurs et sur l'expérience elle-même. Une échelle de Likert invite le répondant à préciser le niveau de son accord avec la proposition qui lui est faite, sur une échelle qui compte généralement entre 3 et 7 niveaux,

mesurant le degré d'approbation de « pas du tout » à « tout à fait ». Cette évaluation est souvent réalisée après une session d'évaluation typiquement formative.

Divers questionnaires existent comme par exemple le questionnaire de présence de Witmer et Singer [WS98], le questionnaire de mal du simulateur SSQ développé par Kennedy et al. [KLBL93] et le système VRUSE qui évalue l'utilisabilité à travers 10 parties de questions, chacune traitant un facteur clé de l'utilisabilité de l'interface comme la fonctionnalité, la cohérence, la fidélité de simulation, etc. [KoCGfMAC96].

- Interview et débriefing : il s'agit d'une évaluation à travers des interviews pour collecter des informations auprès des utilisateurs. Cette méthode d'interview est généralement plus détaillée que les questionnaires, elle permet des réponses spontanées. Ces interviews peuvent être formelles, se déroulant selon un programme, ou semi-guidées, avec un ensemble prédéfini de questions pour orienter les discussions, ou informelles laissant les discussions ouvertes pour avoir les remarques et l'opinion des utilisateurs, fournissant ainsi des informations complémentaires [WAK⁺10].

Évaluation sans utilisateur final

- Inspection cognitive : le principe est d'évaluer la capacité de l'interface à implémenter les activités à réaliser en effectuant les tâches courantes que l'utilisateur aurait à exécuter. Autrement dit, le développeur compare d'un côté les actions que l'utilisateur pourrait tenter de réaliser compte-tenu des objectifs de l'utilisation et, de l'autre côté, les tâches et les actions permises par le système. Cette approche vise principalement à aider à comprendre l'utilisabilité d'un système pour les utilisateurs qui interagissent avec l'outil pour la première fois, notamment pour ceux qui apprennent à l'utiliser en mode exploratoire. En outre, elle cherche à révéler des problèmes potentiels au cours de l'utilisation. L'évaluation de l'utilisabilité se fait lors d'un cas d'utilisation spécifique. L'évaluation est décomposable en deux phases : 1) la phase préparatoire dans laquelle le développeur prépare les tâches et les séquences d'action pour les utilisateurs et 2) la phase d'analyse dans laquelle se déroule l'analyse proprement dite, le développeur valide les interactions fournies par l'outil en fonction de l'interaction typique de l'utilisateur [WRLP94].
- Évaluation heuristique basée sur l'expert : c'est une évaluation dans laquelle des experts de l'évaluation de l'utilisabilité vérifient séparément un ensemble d'heuristiques ou de lignes directrices pour évaluer le prototype en conception. Les remarques et les problèmes rencontrés lors de l'évaluation sont ensuite classés et pris en considération pour engendrer des alternatives de solution et ainsi améliorer le prototype. Toutefois, cette catégorie d'évaluation nécessite de choisir les bonnes heuristiques. Sutcliffe et Gault [SG04] et Sutcliffe et Kaur [SK00] ont proposé une méthode d'évaluation heuristique des outils de RV basée sur 12 heuristiques qui traitent l'utilisabilité et la présence. La méthode a révélé plusieurs problèmes d'utilisabilité et a identifié d'importantes erreurs à travers plusieurs cas d'utilisation.

Ces différentes méthodes sont généralement complémentaires, la plupart des travaux combinent une ou plusieurs méthodes pour un meilleur résultat d'évaluation, les méthodes combinées peuvent être réalisées de façon simultanée ou séquentielle. Il n'existe pas de règles pour l'utilisation de telle ou telle méthodes ou de la combinaison à réaliser. Le choix reste libre en fonction de l'objectif de l'application et des besoins de la conception.

4.1.2 Types d'évaluation de l'utilisabilité des outils de réalité virtuelle dans le domaine architectural

La plupart des travaux réalisant des évaluations de l'utilisabilité des outils de RV dans le domaine architectural ont recours aux méthodes centrées sur l'utilisateur, particulièrement des questionnaires post-hoc et des interviews. Les développeurs préparent généralement des questionnaires sur les aspects et les caractéristiques à évaluer et à revoir, avant les sessions d'évaluation [HF93, Zik07]. Parfois, les tâches à réaliser dans les EVs peuvent varier selon le type de l'utilisateur final, par conséquent les questionnaires et l'évaluation peuvent aussi varier et s'adapter à l'utilisateur final. Par exemple, dans le cas d'un outil de revue de projet destiné à la revue des chambres d'un hôpital, l'utilisateur final peut être le médecin ou l'infirmier ou encore un malade. Les questionnaires d'évaluation pour le personnel de l'hôpital sont plutôt orientés vers l'évaluation de l'espace comme un lieu de travail, tandis que les questionnaires d'évaluation pour le malade sont orientés vers l'évaluation de l'espace comme un lieu de repos et de soin [WAK⁺10].

D'après la définition donnée par Bowman et al. [BGH02] de l'utilisabilité et d'après les travaux de recherche que nous présentons dans la suite, nous pouvons identifier plusieurs types de l'évaluation tels que 1) l'évaluation de la capacité de l'outil de RV à procurer les activités nécessaires à l'utilisateur, 2) l'évaluation de l'intérêt de l'utilisation de la RV dans le processus de conception, pour vérifier le gain qu'elle apporte par rapport aux moyens classiques utilisés habituellement, par exemple la maquette physique pour la revue de projet dans le domaine industriel ou architectural, 3) l'évaluation des tâches et de leur efficacité et 4) l'évaluation de l'appréciation de l'utilisation. Nous allons détailler ces quatre types de l'évaluation.

1) Évaluation de la capacité de l'outil de RV

Avec l'intégration de la RV dans le domaine architectural certains travaux se sont intéressés à la validation de l'utilisabilité des EVs dans le processus de conception en termes de capacité à supporter et à modéliser tous les aspects nécessaires pour la phase de revue. Pour ce faire, Wahlström et al. [WAK⁺10], ont réalisé une comparaison entre une évaluation dans une chambre d'hôpital réel et dans la même chambre en EVI dans un CAVE, afin d'identifier les limites de l'EVI. L'évaluation était basée sur une évaluation qualitative centrée sur l'utilisateur avec l'utilisation de questionnaires post-hoc et d'interviews. A l'issue de cette évaluation, les données collectées ont été ensuite classées et regroupées sous trois catégories : celles qui peuvent être évaluées dans un CAVE, celles qui ne peuvent pas être évaluées dans un CAVE et celles qu'il n'est pas sûr de pouvoir évaluer dans un CAVE. Les résultats de cette comparaison ont montré que l'EVI a permis d'évaluer la plupart des caractéristiques évaluées dans le monde réel. Cependant, plusieurs limites ont été identifiées comme l'évaluation de la température de la chambre, le bruit extérieur et l'évaluation de l'usage pour les personnes à mobilité réduite. Ces manques nécessitent l'intégration et la simulation d'informations supplémentaires. La problématique de la perception des distances était également évoquée dans l'évaluation de la taille des pièces et des distances entre les meubles et les murs. Dans de telles évaluations la perception des distances fait partie des caractéristiques incertaines à évaluer.

2) Évaluation de l'intérêt de l'utilisation de l'outil de RV

En plus de l'évaluation de la capacité de l'EV à permettre les interactions nécessaires aux besoins de l'utilisateur final, l'évaluation présentée maintenant s'est intéressée à l'intérêt des outils de RV dans

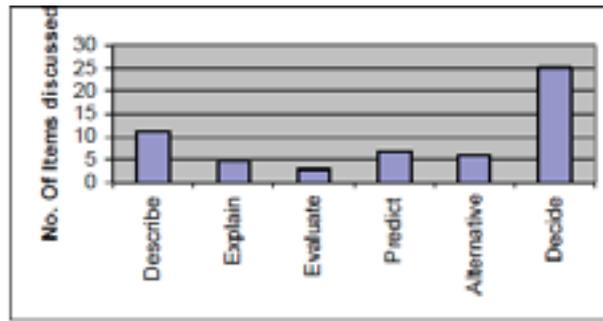


FIGURE 4.1: Classification des problèmes discutés dans un CAVE lors des sessions de revue de projet selon le framework DEEPAND. Image tirée de [MS06]

le processus de conception, en d'autres termes est-ce que l'utilisation de l'outil de RV apporte un gain supplémentaire dans le processus de conception ? Généralement la revue de projet en EV vient se substituer à la revue de projet avec un prototype physique et réduire le coût de cette dernière. Comme dans le travail de Majumdar et al. [MS06] la maquette physique d'une salle d'audience a été remplacée par un modèle de maquette virtuelle visualisé dans un CAVE, comme illustré dans la figure 1.13. Dans des sessions de revue de projet collaboratives, les différents participants au projet, de domaines divers, ont pu voir et évaluer les problèmes de la maquette en EVI lors d'une évaluation formative basée sur des discussions informelles. L'intérêt de la RV a été ensuite évalué à travers un framework appelé DEEPAND (Décrire, Expliquer, Évaluer, Prédire, formuler des Alternatives, Négocier et Décider). Avec ce framework l'efficacité était évaluée en regroupant les problèmes discutés selon les 7 catégories, comme le montre la figure 4.1 avec le nombre de questions pour chaque catégorie. Les résultats ont montré que cette revue collaborative de projet a favorisé la communication entre les participants et leur a permis une meilleure compréhension de l'espace. La plupart du temps était consacré à faire des prédictions et à proposer des alternatives ainsi qu'à prendre des décisions. Donc l'intérêt de la RV est important dans le processus de conception car il permet de modifier la maquette virtuelle autant de fois que nécessaire à moindre coût et d'optimiser le temps de prise de décision.

3) Évaluation de l'efficacité des tâches en EV

L'outil de RV offre souvent un ensemble d'interactions permettant de réaliser certaines tâches en EV. La facilité de la réalisation de ces interactions peut déterminer l'efficacité de l'outil de RV. Dunston et al. [DAM⁺07] ont réalisé une évaluation formative qui s'est déroulée de manière informelle collectant des réponses qualitatives pour évaluer l'ensemble des interactions fournies par leur outil de revue de chambre d'hôpital. Ces interactions se résument globalement dans le déplacement des objets pour évaluer les tâches que l'infirmière doit réaliser dans la pièce. Les participants ont évalué les interactions temps réel comme efficaces et ils ont trouvé l'outil réactif. En outre, l'interaction avec une vue perspective (permettant le changement de vue selon la direction de la tête) a permis une interaction plus intuitive, par exemple la tâche d'ouverture du dernier tiroir de l'armoire était facilitée grâce au changement de point de vue selon la hauteur, lorsque l'utilisateur se baisse pour sélectionner le tiroir et l'ouvrir.

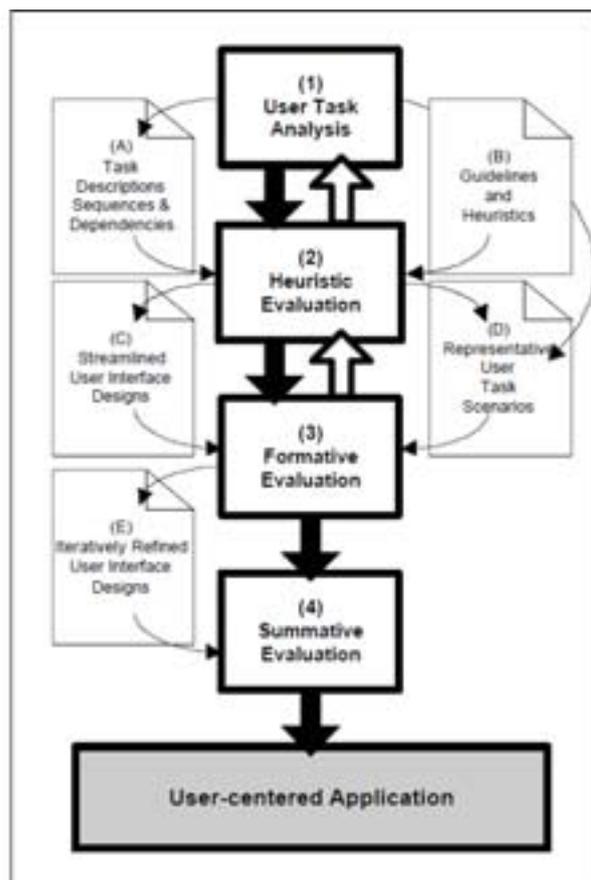


FIGURE 4.2: Le framework de l'évaluation séquentielle, image tirée de [GHS99]

4) Évaluation de l'appréciation de l'utilisation de l'outil de RV

Souvent l'expérience en EV est aussi évaluée sur certains points qualitatifs comme l'appréciation et la facilité de l'utilisation de l'outil de RV. Cette évaluation se fait dans un cas d'utilisation spécifique où l'utilisateur final exécute des tâches proposées et prédéfinies par le concepteur. Après l'utilisation du système dans le cadre applicatif, l'utilisateur donne son opinion et son impression sur l'outil de RV. Cette évaluation est souvent complémentaire à d'autres méthodes d'évaluations comme l'évaluation formative tel que dans [DRRT07]. Dans ce travail, Drettakis et al. [DRRT07] ont appliqué le framework formel proposé par Gabbard et al. [GHS99] et Bowman et al. [BGH02] dans l'évaluation de l'outil de revue de projet lié à la construction du tramway à Nice. Les utilisateurs finaux ont réalisé une liste de tâches définies lors de l'analyse des besoins. Après l'utilisation de l'outil, les utilisateurs ont remplis des questionnaires subjectifs pour évaluer le réalisme et l'efficacité de l'outil ainsi que leur niveau de satisfaction. Ces questionnaires étaient suivis par une interview informelle pour identifier les problèmes non évoqués dans les questionnaires.

Bilan

Nous avons décrit dans cette section les méthodes d'évaluation des outils de RV et les types d'évaluation dans le domaine architectural qui seront utiles pour définir notre principe et type d'évaluation de l'outil de revue de projet CIMBEES.

Dans le cadre de ce projet, l'objectif de l'outil de RV est de fournir une solution d'aide à la décision.

Comme introduit dans le chapitre 1, ces décisions portent sur le choix des détails constructifs notamment le nombre et l'agencement de pièces et les surfaces, par conséquent elles se basent principalement sur la perception des distances. Nous constatons que l'efficacité de notre outil de revue de projet repose sur la pertinence des décisions prises. Ceci détermine notre type d'évaluation qui correspond à l'évaluation de l'efficacité de la tâche d'estimation des distances en EV.

Pour cette évaluation, nous suivons une méthode centrée sur l'utilisateur. Nous nous basons particulièrement sur *une évaluation formative formelle* à l'aide d'un questionnaire, *des questionnaires post-hoc* et *une interview*. Pour l'évaluation formelle, nous proposons un questionnaire pour évaluer la perception des distances, dans le cadre de visites virtuelles de maison.

Dans la section suivante, avant de décrire ce questionnaire, nous dressons un état de l'art des méthodes d'estimation des distances.

4.2 Méthodes d'estimation des distances

L'évaluation de l'outil de revue de projet CIMBEES s'appuie sur des estimations de distances faites par les utilisateurs en EV. Pour évaluer les biais dus à l'EV, ces mesures de distances doivent être faites par les méthodes les plus appropriées car peu de personnes sont capables de restituer une évaluation métrique pertinente.

Diverses méthodes existent pour restituer la distance perçue par un utilisateur en EV sous une forme quantifiable. Nous allons présenter les méthodes en précisant les contraintes matérielles et l'échelle de distance adaptée.

4.2.1 L'estimation verbale

Elle consiste à donner la distance perçue avec une unité de distance familière (mètre, pied). Elle est utilisée dans plusieurs travaux [HF93, PdIRK⁺13, Zik07]. Le principe de cette méthode est simple, par conséquent, elle est utilisable quelque soit le dispositif d'affichage et l'environnement physique des tests. Un inconvénient de cette méthode est que l'estimation n'est pas basée que sur la perception mais également sur des connaissances métriques, ceci a une influence sur son efficacité. En effet, pour qu'une personne estime une distance en mètre, il faut qu'elle y ait une idée précise de ce que représente un mètre dans la réalité or, la plupart des personnes, et particulièrement les femmes, n'ont pas ces connaissances métriques.

Fournir ces connaissances métriques avant la tâche d'estimation des distances peut conduire à des estimations plus précises. Par exemple, montrer un ruban d'un mètre aux sujets avant de commencer l'expérimentation, leur donne une idée sur la dimension d'un mètre dans la réalité. Dans leur expérimentation, Piryankova *et al.* [PdIRK⁺13] utilisent l'estimation verbale pour l'estimation des distances en environnement réel. Avant de commencer l'expérimentation, l'expérimentateur montre un ruban d'un mètre aux sujets. L'estimation des distances qui en a découlé était précise et proche des distances réelles.

Par ailleurs, pour éviter ce problème, Nevena [Zik07] utilise une estimation verbale avec une unité métrique mais où le sujet choisit la réponse parmi un choix de valeurs qu'on lui propose. Ce principe permet de donner une valeur discrète et de rester dans un intervalle d'erreur raisonnable.

4.2.2 Les actions guidées

Dans les actions guidées l'utilisateur effectue une action pour juger de la distance. Nous regroupons trois méthodes sous cette catégorie, deux méthodes basées sur la marche : la marche aveugle directe et la marche aveugle triangulée, comme le montre la figure 4.3, et une méthode basée sur l'action physique de lancer " tâche de lancer ". Dans la marche aveugle directe, le sujet regarde une cible pendant un laps de temps. Puis, les yeux bandés, il marche droit, jusqu'à ce qu'il juge avoir atteint la cible. À la fin, la distance est mesurée entre sa position initiale et sa position finale. Cette méthode peut être aussi utilisée pour estimer la distance entre deux objets. Dans ce cas, à partir d'une position de départ, le sujet marche droit jusqu'à ce qu'il juge avoir marché la distance entre les deux objets. Dans la marche aveugle triangulée, le sujet regarde une cible face à lui. Ensuite, il doit se tourner généralement d'un angle de 90° et faire quelques pas vers l'avant. Lors du signal d'arrêt de l'expérimentateur, il doit se tourner pour pointer la cible. La distance est ensuite calculée en utilisant les angles de rotation, et la distance marchée. Selon la distance perçue, la technique basée sur la marche nécessite un espace physique grand pour réaliser la marche, ce qui rend son utilisation contrainte à l'espace physique disponible. Généralement elle est utilisée avec un HMD.

Ces deux méthodes donnent généralement des estimations assez précises, notamment en environnement réel [KSS⁺09, GNP⁺10].

Dans la tâche de lancer, le sujet regarde la cible pendant un moment puis, les yeux bandés, il se retourne et lance un sac rempli de graines en tentant de reproduire la distance perçue. La distance mesurée est celle mesurée entre lui et le sac. Avec ce principe, l'estimation se dégrade pour les grandes distances [JA.83]. En effet, il est difficile de reproduire des distances au delà de 10m [EL87]. Par conséquent cette méthode est limitée aux petites distances.

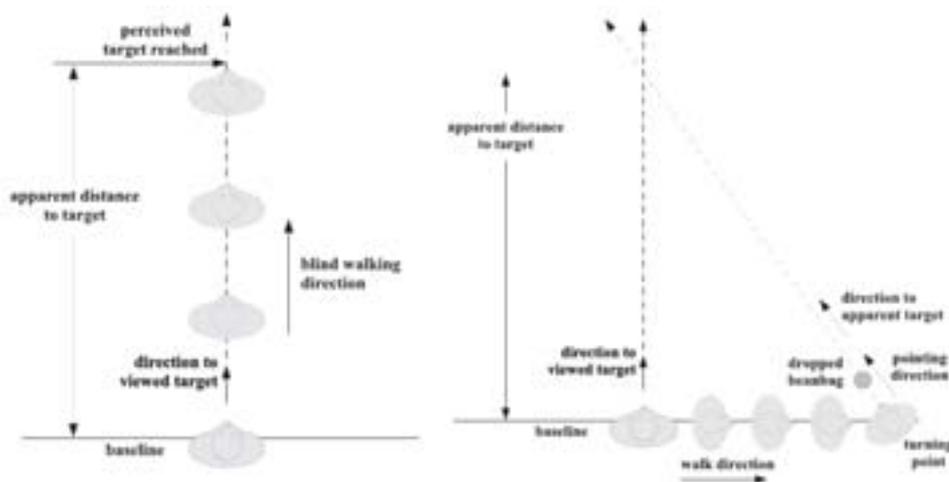


FIGURE 4.3: La figure à gauche illustre le principe de l'estimation avec la marche directe. La figure à droite illustre le principe de l'estimation avec la marche indirecte triangulée. Image tirée de [KSS⁺09].

Klein *et al.* [KSS⁺09] proposent un protocole pour comparer l'efficacité de la marche aveugle triangulée dans l'environnement réel et les EVIs avec un mur immersif et un CAVE. Le sujet regarde la cible en portant entre ses mains un sac de fèves, lorsqu'il se sent prêt à donner une estimation il se retourne de 90° à droite, regarde à nouveau la cible, puis ferme les yeux et marche jusqu'à ce que l'expérimentateur lui demande de s'arrêter après 2.5m. En gardant les yeux fermés le sujet doit juger de la distance en

trouvant l'angle de rotation nécessaire pour pointer la cible observée. Pour ce faire, il se retourne vers la cible, tend ses bras vers l'avant et pointe la cible avec le sac qu'il a en main puis le lâche. Le sac permet de désigner l'angle de rotation de l'utilisateur sur le sol. L'expérimentateur marque la position du sac et la position des talons du sujet, puis calcule la distance en fonction de l'angle. Cette méthode a donné plus de sous estimation dans les deux EVIs qu'en environnement réel. L'estimation dans les EVIs est plus compliquée à cause de la petite taille de la salle d'expérimentation. En effet, le sujet face au mur immersif ou à l'écran du CAVE n'a pas assez d'espace pour réaliser la tâche de la marche compte tenu du matériel de l'expérimentation également dans l'espace.

Thompson *et al.* [TWG⁺04] proposent un protocole similaire pour comparer l'estimation des distances égocentriques avec la marche aveugle triangulée en environnement réel et EVI visualisé à l'aide d'un HMD. Les distances obtenues sont précises en environnement réel tandis qu'elles sont sous estimées en EVI. Ce résultat est conforme au résultat trouvé par Klein *et al.* [KSS⁺09]. Néanmoins, ici le principe de la marche triangulée est légèrement différent, le sujet se tourne de 70° au lieu de 90° avant de commencer à marcher, comme le montre la figure 4.4.

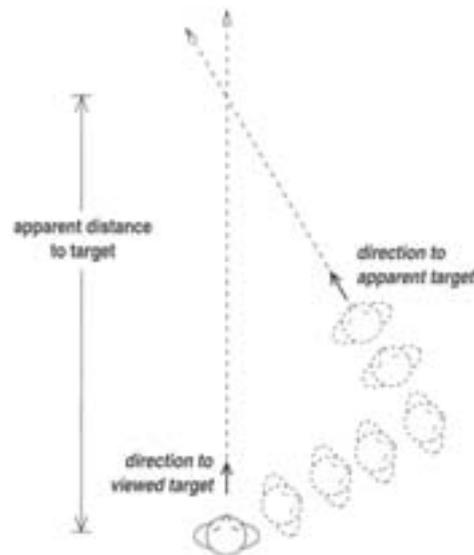


FIGURE 4.4: Figure illustre la marche aveugle triangulée avec un angle de 70°. Image tirée de [TWG⁺04].

Le principe de la marche aveugle triangulée peut être différent d'une étude à l'autre. Riecke *et al.* [RBS09] proposent le même protocole que [KSS⁺09, TWG⁺04] mais dans ce travail la marche aveugle triangulée utilise 3 segments de marche au lieu de 2, comme le montre la figure 4.5. Dans l'expérimentation, le sujet observe la cible, lorsqu'il est prêt à estimer la distance, il ferme les yeux et se tourne vers la droite de 90°, il fait un pas sur le coté, puis il marche droit jusqu'au signal d'arrêt donné par l'expérimentateur. À cette étape, il doit se tourner vers la cible puis marcher la distance qu'il juge nécessaire pour atteindre la cible. À la différence des deux travaux précédents, les distances estimées sont précises dans les deux environnements, réel et virtuel.

Que se soit avec la marche aveugle ou avec la tâche de lancer, ces actions guidées nécessitent une phase d'entraînement à la technique avant de commencer l'estimation. Sahm *et al.* [SCRTW05] proposent un protocole pour comparer l'estimation des distances avec les méthodes de marche aveugle directe et la tâche de lancer pour 4 distances entre 3 et 6m comme le montre la figure 4.6. Avant de commencer

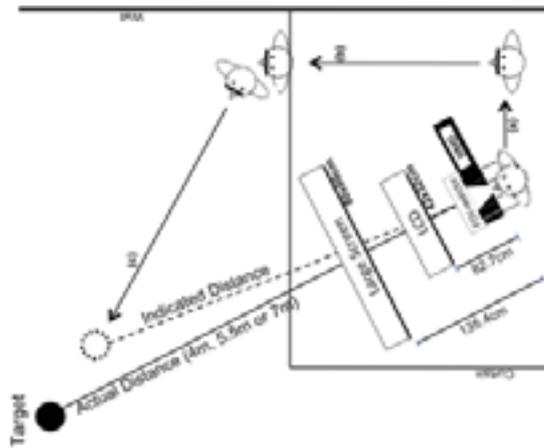


FIGURE 4.5: Figure illustre le principe de la marche aveugle triangulée basé sur trois segments de marche. Image tirée de [RBS09].

l'expérimentation, le sujet s'entraîne à la marche aveugle et à la tâche de lancer. Pour cette dernière, l'expérimentateur donne des corrections au sujet en lui demandant de lancer plus loin ou plus proche pour améliorer la performance durant l'expérimentation. Les deux méthodes ont donné la même performance, les distances sont sous estimées d'environ 30%. Ces performances similaires peuvent être liées à la nature des deux méthodes qui nécessitent une action physique pour estimer les distances.



FIGURE 4.6: Figure illustre l'estimation des distances avec la tâche de lancer. Image tirée de [SCRTW05].

Afin de reproduire des grandes distances avec la tâche de lancer, une solution consiste à combiner la marche aveugle directe et la tâche de lancer. Dans son expérimentation, Thomson [JA.83] utilise les deux méthodes afin d'estimer des distances de l'ordre de 10m. Dans ce travail, le sujet regarde la cible pendant un moment, ensuite, il ferme les yeux et marche une certaine distance jusqu'au signal d'arrêt de l'expérimentateur, il s'arrête pour lancer un sac de graines à la distance observée. Dans l'expérimentation, les distances de lancer varient entre 1 et 5m et les distances de la marche varient entre 5 et 9m.

Toutefois, il a été conclu que cette méthode peut dégrader davantage les estimations. En effet, ce principe d'estimation des distances peut avoir deux sources d'erreur : une liée à la marche et l'autre liée à la tâche de lancer, ce qui peut provoquer plus de dégradation à l'estimation.

4.2.3 Les correspondances perceptuelles

Son principe repose sur le réglage de la distance ou de la taille d'un objet cible en fonction de la distance ou de la taille d'un objet référent. Cette catégorie regroupe « la méthode d'ajustement » et la « bissection perceptive » qui se base sur le placement d'un objet à mi-distance.

Sinai *et al.* [SWR⁺] réalisent une étude dans laquelle ils testent l'efficacité de la méthode d'ajustement pour l'estimation des distances. Dans une salle en forme de L visualisée avec un HMD, l'observateur regarde une cible : *un poteau* à des distances de 5, 10, 20 et 30 m. Puis, il se tourne de 90° vers l'autre partie de la salle virtuelle pour estimer la distance perçue. Un drapeau a été placé à une distance de 15m, l'observateur doit régler à l'aide d'un joystick la distance entre lui et le drapeau de telle sorte qu'il reproduise la distance qu'il vient de voir. Cette méthode donne des estimations précises avec une légère surestimation de 7%.

La méthode d'ajustement est simple et peut être utilisée dans n'importe quelle configuration matérielle. Cependant, dans ce travail, le sujet avait la possibilité de se tourner vers la cible autant de fois qu'il voulait pour corriger la distance réglée ce qui peut justifier la précision obtenue. Il serait judicieux d'éliminer cette possibilité de correction afin de s'assurer de l'efficacité de la méthode.



FIGURE 4.7: Stimuli visuels utilisés pour l'estimation avec la méthode d'ajustement : l'utilisateur règle la taille de la bouteille virtuelle en fonction de sa position en EV et de la taille de la vraie bouteille. Image tirée de [KPSD08].

La méthode d'ajustement peut se faire entre les deux environnements : virtuel et réel. Dans ce cas là, l'objet de référence est placé en environnement réel tandis que la tâche d'ajustement se fait en EV. Kenyon *et al.* [KPSD08] utilisent ce principe dans leur expérimentation, l'objet cible est une bouteille de *Coca-Cola*. Une bouteille réelle est placée dans la salle de l'expérimentation à côté de l'observateur à une distance fixe. En EV, l'observateur doit reproduire la même taille sur la bouteille virtuelle placée à des distances différentes de lui, comme le montre la figure 4.7.

L'estimation des distances avec la bissection perceptive revient à observer une cible positionnée à une certaine distance et à indiquer ensuite la moitié de cette distance. Lapping *et al.* [LSR06] utilisent cette méthode en environnement réel. Dans ce travail, la cible est une personne (l'un des expérimentateurs), positionnée debout à deux distances : 15 ou 30m, en face du sujet. Pour juger de la distance, le sujet doit indiquer la moitié de cette distance en plaçant une deuxième personne au milieu en lui demandant oralement d'avancer ou de reculer jusqu'à ce qu'il juge que la personne se trouve au milieu, comme



FIGURE 4.8: Figure illustre l'estimation des distances avec la bissection en environnement réel. Image tirée de [LSR06].

le montre la figure 4.8. Le taux d'erreur dans l'estimation est le même pour les deux distances (15 et 30m). Ce résultat montre que, contrairement à la tâche de lancer, l'efficacité de la méthode de bissection perceptive en environnement réel ne dépend pas de la distance à estimer.

Meng *et al.* [MRB06] reproduisent la même expérimentation en EV, le stimulus visuel est une reproduction de l'environnement réel et les personnes sont représentées à l'aide d'avatars. En EV, les distances estimées sont précises à 15m et sous estimées à 30m.

Le principe de la correspondance perceptuelle permet de l'utiliser avec tous les dispositifs d'affichage. Par ailleurs, l'estimation avec la méthode d'ajustement se basant principalement sur la perception visuelle, ceci peut être un avantage lorsque l'objet de référence existe en environnement réel. Dans le cas contraire, l'estimation correspondra juste à mesurer les différences perceptibles.

4.2.4 Le temps imaginé de la marche

Avec cette méthode, le sujet regarde une cible pendant un intervalle de temps puis, il ferme les yeux et lance un chronomètre tout en imaginant qu'il marche la distance perçue. Une fois qu'il juge avoir reproduit cette distance, il arrête le chronomètre. Par la suite, la distance est calculée en s'appuyant sur le temps mesuré et la vitesse de la marche du sujet, cette dernière étant généralement mesurée avant ou après les tests. Pour estimer la vitesse de marche du sujet, l'expérimentateur calcule le temps nécessaire pour que le sujet marche une certaine distance [PKCR05]. Cette méthode est simple car elle ne nécessite aucun espace spécifique pour le déplacement et donc elle est adaptée à tout dispositif d'affichage.

Grechkin *et al.* [GNP⁺10] proposent un protocole pour comparer l'estimation des distances (6, 9, 12, 15 et 18m) par temps imaginé de la marche pour plusieurs conditions : 1) environnement réel, 2) environnement réel vu à travers un HMD, 3) EV visualisé avec un HMD, 4) EV visualisé avec un LSID et 5) EV réaliste (reproduit à partir de photos réalistes de l'environnement) visualisé à travers un LSID. Les distances sont légèrement sous estimées en environnement réel et davantage sous estimées en EV.

Dans une autre expérimentation, afin de réaliser une comparaison avec le résultat précédent, les auteurs utilisent la méthode de la marche aveugle directe mais uniquement dans les conditions où la marche directe est possible : conditions 1), 2) et 3). Dans ces conditions en environnement réel, l'estimation des distances est plus précise avec la marche aveugle directe. Par ailleurs, dans ces trois conditions, l'estimation des distances est similaire avec le temps imaginé de la marche. Avec la marche aveugle directe, elle est sous estimée avec le HMD, et se dégrade dans des EVs. Cette dégradation avec la marche aveugle directe

lorsque le sujet porte le HMD s'explique par la difficulté de la marche en raison des câbles du dispositif encombrant l'espace.

Le temps imaginé de la marche est généralement réalisé les yeux fermés [GNP⁺10]. Plumert *et al.* [PKCR05] dans leur expérimentation demandent eux aux sujets d'estimer les distances les yeux ouverts. Ils proposent un protocole pour comparer la performance de la méthode dans l'environnement réel et l'EVI avec un CAVE en considérant plusieurs distances : 6, 12, 18, 24, 30 et 36 m. L'ordre de passage dans les deux environnements a une influence significative. En effet, lorsque le sujet commence par l'environnement virtuel, les distances sont sous estimées en EV plus qu'en environnement réel et se dégradent encore plus à partir de 12m dans les deux environnements. Par ailleurs, lorsque le sujet commence par l'environnement réel, les estimations sont similaires dans les deux environnements. Elles sont presque précises jusqu'à 18m ; au delà, elles sont davantage sous estimées. Pour comprendre ce comportement, les auteurs ont réalisé une autre expérimentation qui utilise cette méthode avec et sans vision pour vérifier si cette différence provient de la présence de vision lors de l'estimation mais les résultats sont similaires dans les deux cas.

Dans une troisième expérimentation, Plumert *et al.* comparent la performance entre les deux méthodes : le temps estimé de la marche (avec ou sans vision) et la marche aveugle directe pour des distances de 6, 9, 12, 15, 18 et 21 m. Les résultats révèlent une même performance avec les deux méthodes.

Nous pouvons dire que ce dernier résultat provient probablement de la similarité du principe entre les deux méthodes : le temps estimé de la marche et la marche aveugle directe. En effet, dans la première, le sujet doit imaginer son déplacement pour atteindre la cible. Dans la deuxième, il effectue l'action de déplacement, tout en imaginant le déplacement nécessaire pour atteindre la cible.

4.2.5 Jugement de faisabilité

Le jugement des distances se fait à travers l'estimation de la possibilité de faire ou non des actions. Cette méthode permet d'évaluer les distances en amorçant une intention d'agir sans nécessiter de réaliser l'action elle-même ce qui évite le problème de la taille de l'espace physique. En effet, les décisions se font sur la possibilité de réaliser les actions et non sur la réalisation de l'action. Par conséquent, elle peut être utilisée avec tous les dispositifs d'affichage.

Geuss *et al.* [GSCRT10] proposent un protocole pour comparer l'estimation des distances avec cette méthode dans les deux environnements réel et virtuel. La scène virtuelle est une reproduction d'un environnement réel qui représente une salle de cours dans lequel deux poteaux ont été placés verticalement. Ils sont séparés d'une certaine distance (25, 30, 35, 40, 45 et 50 cm), comme le montre la figure 4.9. Dans l'expérimentation, le sujet est debout en face des poteaux à des distances différentes (3, 4.5 et 6 m) et il juge de la distance entre les deux poteaux en indiquant, par oui ou non, s'il peut passer ou non sans tourner ses épaules entre les deux poteaux. L'expérimentateur change à chaque fois la distance entre les deux poteaux. Cette méthode donne la même performance dans les deux environnements.

Le jugement de faisabilité peut se faire de plusieurs manières. Loomis *et al.* [LK03] proposent un protocole d'estimation des distances en environnement réel qui utilise le jugement de faisabilité pour estimer la taille d'une ouverture dans un mur. Dans ce travail, le sujet, au lieu d'indiquer la faisabilité de passage en répondant par oui ou non, réajuste la largeur de l'ouverture soit en l'agrandissant soit en la diminuant, de telle sorte qu'il puisse juste y passer.

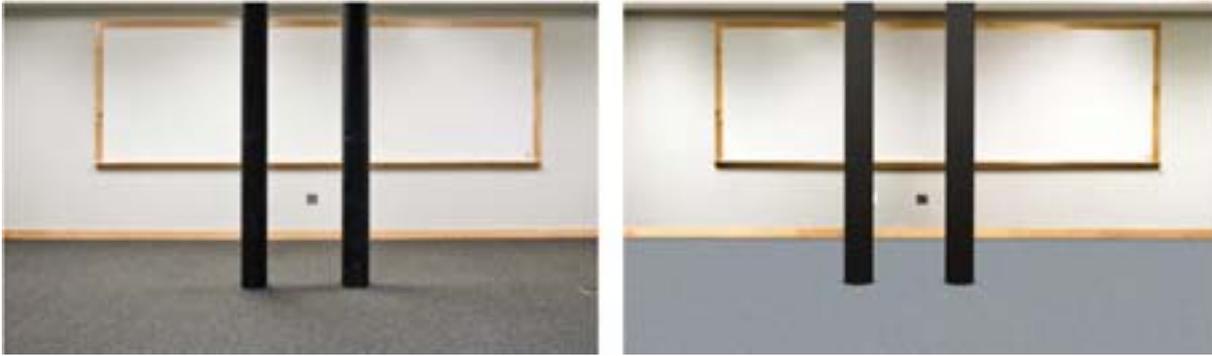


FIGURE 4.9: Figure illustre l'estimation des distances avec le jugement de faisabilité, le sujet juge la possibilité de passer entre les deux poteaux. Image tirée de [GSCRT10].

Le principe du jugement de faisabilité ressemble au temps imaginé de la marche. En effet, les deux se basent sur l'imagination de l'action à faire pour juger de la distance sans la réalisation de l'action elle-même.

4.2.6 Bilan

Dans cette section nous avons présenté les différentes méthodes d'estimation des distances. Comme nous l'avons précisé, ces méthodes, selon leur principe, peuvent avoir des contraintes sur le matériel ou sur l'échelle de distance à restituer, que nous résumons ci-dessous. En conséquence, dans une expérimentation, le choix d'une méthode ou d'une autre dépend de la configuration matérielle et de la distance à estimer.

1. Le principe de l'estimation verbale est simple, ce qui permet son utilisation quelque soit le dispositif d'affichage et l'environnement physique des tests. Toutefois, son inconvénient est qu'elle est basée sur des connaissances métriques pouvant donc influencer son efficacité en terme de précision.
2. Les actions guidées nécessitent un espace physique grand selon la distance à restituer. Concernant la marche directe ou indirecte, la méthode est moins efficace dans le cas des murs immersif [KSS⁺09], c'est pourquoi elle est généralement utilisée avec un HMD. Concernant la tâche de lancer, les grandes distances au-delà de 10m sont difficiles à reproduire [EL87] ce qui restreint son utilisation aux petites distances.
3. Le principe des correspondances perceptuelles est simple et peut être utilisé dans n'importe quelle configuration matérielle. L'efficacité de la méthode de bissection perceptive en EV dépend de la distance à estimer, les grandes distances sont plus sous estimées.
4. Le temps imaginé de la marche ne nécessite aucun espace spécifique pour le déplacement et donc cette méthode est adaptée à tout dispositif d'affichage.
5. Le jugement de faisabilité ne nécessite pas la réalisation de l'action elle-même, ce principe évite le problème de la taille de l'espace physique et permet l'utilisation de la méthode avec tous les dispositifs d'affichage.

Par ailleurs, comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 2, les méthodes d'estimation des distances sont considérées comme un facteurs influant la perception des distances [RVH13]. Là aussi, la précision des distances estimées et la sous/surestimation sont très variées d'une étude à l'autre. En conséquence,

nous ne pouvons pas confirmer qu'une méthode est meilleure que l'autre. Selon les travaux précédents, la méthode basée sur la marche directe ou indirecte est généralement plus précise [KSS⁺09, GNP⁺10].

Nous notons aussi que parfois le choix d'une méthode dépend du contexte de l'expérimentation comme nous allons voir dans la section suivante concernant l'évaluation de l'outil de revue de projet CIMBEES.

4.3 L'évaluation de l'outil de revue de projet CIMBEES

Nous constatons que le choix d'une méthode d'évaluation des distances reste limité en raison des contraintes de chaque méthode. Pour notre évaluation nous écartons les actions guidées car dans notre salle de RV nous ne possédons pas un grand espace physique dégagé pour réaliser des actions. Par ailleurs, les correspondances perceptuelles et le temps imaginé de la marche ne semblent pas adaptés à notre contexte d'évaluation. En effet, lors des visites virtuelles l'utilisateur doit se projeter dans la maison et imaginer son futur habitat, lui demander de fermer les yeux et imaginer le temps nécessaire pour évaluer la largeur d'un mur ou l'évaluer en utilisant la correspondance perceptuelle n'est pas très approprié car les deux méthodes perturbent son immersion et sa visite virtuelle.

Partant des deux méthodes restantes : estimation verbale et jugement de faisabilité, notre idée est d'évaluer la perception des distances et des volumes sans demander une quantification directe en mètre qui pose le souci des connaissances préalables des sujets. Pour contourner ce problème de l'estimation verbale nous utilisons le principe des questions fermées à choix unique. Pour juger de la taille des murs, nous demandons aux sujets de les évaluer en choisissant une valeur parmi quatre propositions. Pour juger du confort de vie des différentes pièces nous utilisons le jugement de faisabilité en demandant aux sujets de juger des possibilités d'aménagement et des situations de vie à travers des questions subjectives sur une échelle. Le principe de la méthode de jugement de faisabilité est bien adapté au contexte de visite virtuelle car pour répondre aux questions, le sujet doit percevoir l'espace et juger sa capacité à réaliser l'action dans cet espace, donc ce principe l'incite à se mettre en situation pour juger de la taille de l'espace. Nous regroupons ces différentes questions dans un questionnaire de compréhension spatiale que nous détaillons ci-dessous. Ce questionnaire a été élaboré avec les architectes du projet et les questions s'inspirent de celles observées lors de visite réelles.

Pour une évaluation globale de l'outil de revue de projet, nous avons également évalué le sentiment de présence en utilisant le questionnaire standard de Witmer *et al.* [WS98] et le mal du simulateur à l'aide du questionnaire standard de Kennedy *et al.* [KLBL93]. Pour compléter les données, et afin de traiter des aspects non abordés dans les questionnaires, nous avons réalisé une séance de débriefing semi-guidé.

4.3.1 Questionnaire de compréhension spatiale (CS)

Dans une visite réelle de maison, les acheteurs potentiels font le tour de la maison, jugent de la taille des pièces et de la maison et essayent de s'y projeter. À travers le déplacement dans la maison, ils arrivent, en fin de visite, à se créer une image complète de la maison. Suivant ce principe, nous avons développé notre questionnaire de compréhension spatiale en regroupant deux parties : une partie de questions (CS1) et une partie d'évaluation de la carte cognitive (CS2). L'objectif du questionnaire est d'évaluer l'efficacité de l'outil de revue pour la perception des distances et de l'espace.

Questionnaire de compréhension spatiale, partie 1 (CS1)

Cette première partie regroupe quatre catégories de questions : 1) l'estimation des distances, 2) la perception des tailles, 3) l'habitabilité et 4) la difficulté de la tâche. Nous présentons dans les exemples suivants le questionnaire du plan illustré dans la figure 4.10. Quelques exemples de questionnaires utilisés dans nos protocoles expérimentaux sont présentés en annexe A.



FIGURE 4.10: Figure illustre un plan d'une maison T2 visitée par les sujets dans l'expérimentation.

1. L'estimation des distances : pour chaque pièce de la maison l'utilisateur doit estimer les dimensions des pièces, largeur et profondeur, en choisissant parmi quatre propositions la valeur qu'il juge adéquate. Ces questions sont des questions fermées à choix unique, les propositions sont des valeurs en mètre. L'objectif est de rester dans des estimations logiques en évitant une trop grande sous/sur estimation pour garder les dimensions dans un intervalle raisonnable. Les propositions sont calculées avec un écart de 15%. Ce pourcentage a été choisi pour s'assurer que la différence entre les valeurs est supérieure au seuil minimal de différence perceptible pour les distances 3D [DSFW⁺10]. Nous avons choisi de limiter à 4 le nombre de réponses proposées car des écarts trop importants (65%, 80%, etc) auraient pu être trop facilement écartés par les participants.

Il nous fallait également éviter de placer la bonne réponse toujours à la même place dans l'ordre des réponses proposées, afin d'éviter des réponses de type automatique. En tout, sept propositions sont possibles : trois surestimations, trois sous estimations et la bonne valeur (au milieu). Sur ces sept propositions, nous avons utilisé une fenêtre figée de quatre réponses avec la bonne réponse étant à la 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} ou 4^{ème} position.

Le groupe de questions a été construit afin de faire en sorte que le nombre de possibilités de sur estimation et de sous estimation soit équitablement réparti sur l'ensemble des questions (une

question présente une possibilité de sur-estimation de 2 points, une question présente une possibilité de sous-estimation de 2 points, etc.). Exemple :

Cuisine :

- Parmi les propositions suivantes, choisissez la largeur de la pièce : a) 2.2, b) 2.5, c) 2.8, d) 3.1 *m.*
- Parmi les propositions suivantes, choisissez la profondeur de la pièce : a) 1.8, b) 2.2, c) 2.6, d) 3 *m.*

2. La perception des tailles : l'objectif de cette partie du questionnaire est de connaître les facteurs susceptibles d'influencer la façon dont l'environnement virtuel affecte la capacité d'un utilisateur à envisager des possibilités d'aménagement. Il s'agit d'une question importante pour les partenaires du projet. Dans le cadre de la visite virtuelle d'un logement, il est possible de proposer un aménagement type, à partir duquel un prospect doit imaginer son aménagement personnel.

En outre, généralement les acheteurs d'une maison essaient souvent d'imaginer leurs meubles dans la maison pour vérifier si la taille de l'espace permet de les installer. Les questions de *perception des tailles* portent sur la possibilité d'aménager les différentes pièces avec du mobilier décrit dans les questions. Dans cette catégorie nous évaluons la perception des tailles sans demander une quantification directe. En effet, si l'utilisateur arrive à donner la bonne réponse, c'est qu'il arrive à bien percevoir les tailles. Les réponses sont données sur une échelle allant de 1 à 7.

Cuisine :

- Si vous deviez réaménager la cuisine, en remplaçant la grande cuisinière par une petite cuisinière, un lave linge et un réfrigérateur, pensez-vous que l'espace serait : 1) insuffisant, 2), 3), 4), 5), 6), 7) très suffisant.
- Si vous deviez réaménager la cuisine, en remplaçant le grand évier par un autre plus petit et en rajoutant un petit lave linge avec ouverture par le dessus, pensez-vous que l'espace serait : 1) insuffisant, 2), 3), 4), 5), 6), 7) très suffisant.

Séjour :

- Si vous deviez rajouter une table à manger rectangulaire de quatre personnes (deux sur chaque côté) entre le canapé et la cuisine, pensez-vous que l'espace serait : 1) insuffisant, 2), 3), 4), 5), 6), 7) très suffisant.

3. L'habitabilité : cette catégorie de questions porte sur l'évaluation de la capacité de projection et l'évaluation de l'habitabilité. Les questions mettent l'utilisateur dans des situations particulières afin qu'il donne son appréciation du confort de vie possible dans l'habitation. Ces questions subjectives évaluent la taille et les dimensions de l'espace sans demander de quantifications. En effet, à partir de la réponse donnée, nous pouvons évaluer la perception des distances en EV. Les réponses sont données sur une échelle allant de 1 à 7. Comme pour la catégorie précédente, si l'utilisateur donne la bonne réponse, c'est qu'il arrive à bien percevoir les dimensions.

Séjour :

- Imaginez que vous passez une soirée debout dans cette pièce avec cinq autres personnes. Estimez-vous que l'espace disponible vous permettrait de vous sentir : 1) pas à l'aise, 2), 3), 4), 5), 6), 7) très à l'aise.
- Imaginez que vous passez une soirée debout dans cette pièce avec cinq autres personnes. Pensez-vous que se déplacer pour aller au buffet serait : 1) difficile, 2), 3), 4), 5), 6), 7) facile.

- Si vous deviez vous installer sur le canapé avec trois autres personnes, pensez-vous que vous seriez : 1) collés les uns aux autres, 2), 3), 4) coude à coude, 5), 6), 7) espacés.

Chambre :

- Si vous deviez remplacer ce lit par deux lit simples séparés par une table de chevet, pensez-vous que l’habitabilité de la pièce serait : 1) très mauvaise, 2), 3), 4), 5), 6), 7) très bonne.

Salle de bain :

- Si vous deviez vous brossez les dents à deux, pensez-vous que l’espace vous permettrait de vous sentir : 1) pas à l’aise, 2), 3), 4), 5), 6), 7) très à l’aise.

Couloir :

- si vous deviez croiser une personne portant une valise dans l’entrée, pensez-vous que l’espace disponible vous permettrait de le faire : 1) difficilement, 2), 3), 4), 5), 6), 7) très facilement.

Les deux groupes de questions *perception des tailles* et *habitabilité* ont été élaborés en collaboration avec les architectes participant au projet, qui nous ont fourni les normes de construction à respecter dans l’élaboration de projets d’architecture. Il est par exemple recommandé pour les couloirs une largeur minimale de 90 cm pour pouvoir aisément y croiser une autre personne, en considérant qu’une personne à besoin d’une largeur minimale de 40 cm. Ces normes ont servi de base pour évaluer les réponses données par les participants. Par ailleurs, nous avons choisi des questions permettant aux participants de donner une réponse uniquement en imaginant la situation sans avoir une connaissance précise de ces normes de construction, comme par exemple la question concernant le couloir.

Comme nous le voyons dans les exemples des questions, l’évaluation de la bonne réponse est basée sur des normes différentes selon la question. En conséquence, l’échelle nous permet uniquement d’évaluer la précision des estimations (précise, légèrement sous/surestimée, sous/surestimation importante) sans la possibilité de donner un pourcentage spécifique.

De même que l’*estimation des distance*, pour ces deux groupes de question, Il nous fallait également éviter de placer la bonne réponse toujours à la même place dans l’ordre des réponses proposées, afin d’éviter des réponses de type automatique.

Les questionnaires ont été construits afin de faire en sorte que le nombre de possibilités de sur estimation et de sous estimation soit équitablement réparties sur l’ensemble des questions pour chaque groupe (une question présente une possibilité de sur-estimation de 2 points, une question présente une possibilité de sous-estimation de 2 points, etc.).

4. la difficulté de la tâche : l’objectif de l’outil de revue de projet est de procurer un environnement facile permettant de réaliser les tâches demandées. Dans l’évaluation de l’outil, nous trouvons qu’il est important d’évaluer la facilité d’utilisation de l’outil de revue. À la fin de la visite virtuelle nous demandons à l’utilisateur de juger de la difficulté de la visite virtuelle et de l’estimation des distances.
 - Évaluez la difficulté pour visiter et estimer les dimensions des pièces : 1) facile, 2), 3), 4), 5), 6), 7) difficile.

L’ensemble de ces questions est posé lors de la visite virtuelle et ne nécessite pas de mémorisation.

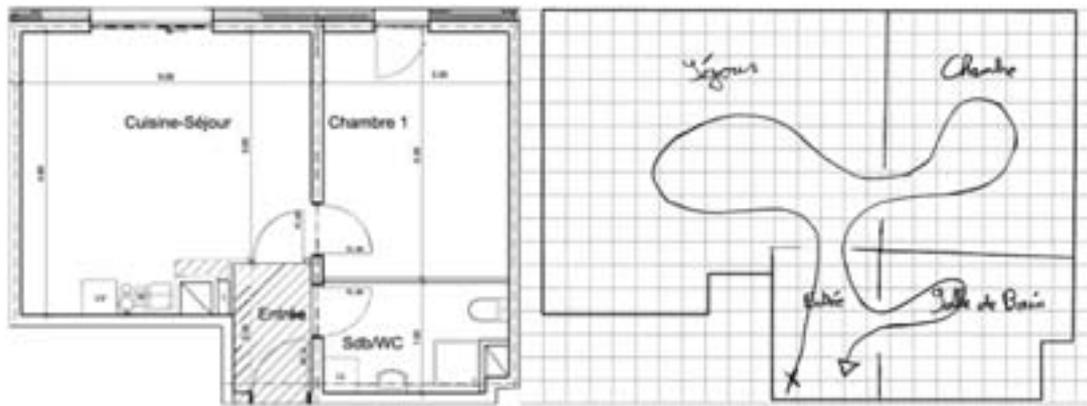


FIGURE 4.12: La figure de gauche montre un exemple de plan d'une maison, la figure de droite montre un exemple de la carte cognitive CS2, avec l'agencement des pièces et le chemin de navigation dessiné par un participant.

Objectifs et faiblesses du questionnaire CS1

Notre démarche n'est pas à proprement parler de quantifier l'erreur de perception mais plutôt d'essayer d'identifier des causes possibles de cette erreur, dans le contexte d'usage que présente le projet CIMBEES. C'est pourquoi nous avons choisi d'inclure dans notre questionnaire des approches différentes. Nous souhaitons savoir si les facteurs étudiés pouvaient avoir une influence différente en fonction du type de question posée (dimension versus aménagement versus habitabilité ; ces deux derniers points, notamment, sont importants dans le contexte du projet).

Le premier groupe de questions du CS1 porte sur l'évaluation métrique (estimation des distances). Nous avons choisi d'utiliser une échelle discrète qui nous permettrait de mettre à jour une tendance à la surestimation ou à la sous-estimation, sans avoir la complexité et la lourdeur d'un protocole visant à quantifier l'erreur. Comme nous l'avons déjà indiqué, nous avons écarté d'emblée l'estimation orale dans la mesure où l'être humain est par nature mauvais dans cet exercice, y compris dans le monde réel. Un tel protocole aurait considérablement alourdi notre expérimentation déjà en soi très longue, environ une heure ou plus par sujet pour les trois expérimentations effectuées. De plus, un résultat de cette nature s'avérerait suffisant dans le contexte du projet. L'objectif du projet étant de fournir un démonstrateur qui limite la tendance connue consistant à sous-estimer les distances en réalité virtuelle afin de ne pas nuire à la démarche de vente. Nous souhaitons ainsi identifier quels paramètres de l'environnement virtuel de démonstration pouvaient permettre de limiter, ou étaient au contraire de nature à accentuer, une éventuelle tendance à l'erreur.

Le deuxième groupe de questions du CS1 concernant la perception des tailles et le troisième concernant habitabilité se sont avérées complexes à établir, faute de ressources bibliographiques. Si la construction d'habitations impose un certain nombre de normes métriques, nous n'avons pas trouvé dans la littérature (en réalité virtuelle et en architecture, après avoir pour cela consulté les architectes participant au projet CIMBEES) de grilles de critères d'évaluation de l'habitabilité. Or, l'habitabilité des modèles d'habitation était un facteur clé du projet, pour des raisons liées à la nature des habitations proposées. Les coûts de construction des habitats innovants proposés par les partenaires du projet imposent en effet aux potentiels acheteurs de retenir des logements de faible superficie. Il était important pour les partenaires de réussir à convaincre que les solutions d'aménagement retenues permettent, malgré une superficie moindre, une

habitabilité équivalente. Aussi, nous avons choisi de construire des questionnaires ad-hoc en concertation avec les architectes. Nous n'avons pas fait valider nos questionnaires par des ergonomes, mais nous les avons soumis à l'expertise des architectes. En première instance, et faute de références scientifiques abordant ces questions, nous avons considéré qu'ils suffiraient à nous permettre de juger de la pertinence de notre approche.

4.3.2 Débriefing semi-guidé

L'objectif du débriefing est d'avoir des informations complémentaires aux données récoltées à travers des questionnaires. Lors de ce débriefing nous essayons d'aborder des éléments non évoqués dans la visite virtuelle ou dans les questionnaires. Ce débriefing se fait à la fin de l'expérience en EV.

Nous ciblons quelques questions pour collecter des informations sur les connaissances métriques des participants (dimension standard des meubles et portes) et la stratégie utilisée pour répondre aux questions de compréhension spatiale.

Exemple : 1) Quelle est la taille standard d'un lit, des portes, etc.
2) Quelle stratégie avez-vous utilisé pour donner vos réponses concernant les dimensions des pièces, la taille des meubles, etc.

4.4 Conclusion

L'évaluation des outils de RV constitue une phase importante dans la conception de l'outil afin de s'assurer de son intérêt et de son efficacité dans la réalisation des tâches requises. Elle peut se faire selon deux méthodes : soit une évaluation avec l'utilisateur final, soit une évaluation par le développeur ou des experts. Dans ce chapitre, nous avons d'abord, présenté différentes méthodes d'évaluation. Puis, nous avons proposé une revue de quelques évaluations. Au travers de l'analyse des objectifs de ces évaluations, nous avons constaté qu'il y avait quatre types d'évaluation des outils de revue de projet :

- 1) Capacité de l'outil de RV à modéliser les interactions nécessaires.
- 2) Intérêt et gains apportés par l'outil de revue de projet.
- 3) Actions dans l'EV et l'efficacité de l'outil.
- 4) Avis et l'appréciation de l'utilisateur.

Une partie de notre travail consiste à évaluer l'outil de revue de projet CIMBEES, d'après ces quatre types, notre évaluation porte sur 3) l'évaluation de l'efficacité de l'outil dans la réalisation des tâches, principalement la prise de décisions et la validation de la maquette virtuelle, et 4) l'évaluation de l'appréciation de l'utilisateur.

Partant du contexte de l'utilisation et des objectifs de l'outil de revue de projet, nous avons pu constater que la perception des distances constitue la principale base des décisions à prendre en EV. Néanmoins, les distances sont généralement mal évaluées en EV. Cette problématique a été largement évoquée dans le chapitre 2. L'obstacle principal est donné par la difficulté de trouver une méthode pertinente d'évaluation des distances car la plupart des personnes n'arrivent pas à chiffrer une distance.

Pour cette raison, nous avons proposé un questionnaire permettant, à la fois d'évaluer la maquette numérique comme dans une visite réelle, et également d'évaluer la perception des distances et la compréhension de l'espace. Ce questionnaire incite l'utilisateur à se projeter dans l'EV et à répondre aux questions

en s'appuyant sur les distances perçues sans donner une évaluation chiffrée. À partir des réponses, nous avons pu évaluer la perception des distances.

La partie III est consacrée à la description des études expérimentales réalisées dans le cadre de cette thèse. Les expérimentations sont basées sur la méthode d'évaluation élaborée et présentée dans ce chapitre.

Troisième partie

Expérimentations et résultats

Introduction

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons principalement à la problématique de la perception des distances lors des visites virtuelles de maison. Dans un tel contexte, l'utilisateur doit juger de la distance comme le volume et les dimensions des pièces, pour se décider sur le plan de la maison. Par conséquent, une mauvaise perception des distances fausse les décisions prises et peut conduire à des mauvaises surprises après la construction de la maison. Notre objectif est de proposer un outil de revue de projet fiable permettant une bonne perception des distances en EV.

Toutefois, comme nous l'avons présenté dans le chapitre 2 plusieurs facteurs sont impliqués dans la perception des distances. Cette dernière est altérée différemment selon la combinaison de ces facteurs et l'EV utilisé (dispositif d'affichage, scène virtuelle, etc). En conséquence, les résultats des travaux précédents ne peuvent pas être généralisés à tous les EVs. Pour cette raison, nous avons mené trois études expérimentales afin de choisir les paramètres de l'EV selon notre objectif final.

Par rapport à l'état de l'art proposé, nous nous intéressons à l'influence d'une variété de paramètres couvrant ainsi les facteurs techniques, les facteurs compositionnels et les facteurs humains. Plus particulièrement, la vitesse de navigation, l'ameublement des maisons (la scène virtuelle), le profil cognitif des individus, le champ de vision, la vision stéréoscopique et le suivi de la tête. Nous allons étudier l'influence de ces paramètres en variant leur valeurs pour trouver la bonne combinaison permettant une meilleure perception des distances lors des visites virtuelles de maison.

Par ailleurs, les grands écrans semi-immersifs manquent de projection au sol. Cette absence de projection réduit le champ de vision vertical et induit un problème de visibilité entre le sujet et l'écran. En d'autre terme, l'utilisateur face à l'écran n'a pas la possibilité de voir la partie de la scène qui se trouve entre lui et l'écran d'affichage. Par conséquent, ceci peut influencer la perception et la compréhension de l'espace l'entourant.

Nous proposons une technique de projection permettant de résoudre ce problème. Cette technique permet d'élargir le champ de vision vertical et permet de voir sur l'écran l'espace personnel entourant l'utilisateur.

Nous avons mis en place trois expérimentations qui nous permettent de choisir les paramètres pour notre outil de revue de projet architectural et de les évaluer. À l'issue de ce travail nous proposons des lignes directrices pour aiguiller les concepteurs dans le choix des paramètres pour les outils de revue de projet architectural.

Expérimentation I : L'influence du profil cognitif, l'ameublement des maisons et la vitesse de navigation sur l'estimation des distances lors des visites virtuelles de maison

Sommaire

5.1	Les facteurs identifiés et motivations	112
5.1.1	La vitesse de navigation	112
5.1.2	L'ameublement des maisons	113
5.1.3	Le profil cognitif	113
5.2	Protocole expérimental	114
5.2.1	La méthode	114
5.2.2	Matériel et stimuli visuels	114
5.2.3	Participants	115
5.2.4	Mesures et évaluation du questionnaire de compréhension spatiale (CS) . . .	115
5.2.5	Hypothèses	118
5.2.6	Procédure	119
5.3	Résultats	120
5.3.1	Les tendances dans les estimations	121
5.3.2	Profil cognitif	123
5.3.3	Vitesse de navigation	125
5.3.4	L'ameublement des maisons	126
5.3.5	L'orientation et la visualisation spatiale	128
5.3.6	L'espace de confort	128
5.4	Discussion	128
5.4.1	Les tendances dans les estimations	128

5.4.2	Profil cognitif	129
5.4.3	Vitesse et ameublement des maisons	130
5.5	Conclusion	131

Notre outil de revue de projet est destiné à une variété de personnes de tout âge, allant des plus jeunes aux séniors. Lors des visites virtuelles de maison, l'utilisateur se déplace dans la maison virtuelle pour l'explorer et évaluer son plan. Ces maisons peuvent être meublées ou non meublées.

D'après l'objectif et les fonctionnalités de notre outil de revue de projet (discuté dans le chapitre 3), dans cette première expérimentation, nous nous sommes intéressés à l'étude de trois facteurs de base : 1) la vitesse de navigation, 2) l'ameublement et 3) le profil cognitif des utilisateurs. Concernant la vitesse de navigation, nous comparons l'influence de trois vitesses de navigation différentes sur l'estimation des distances et la visite virtuelle. De même pour l'ameublement, nous comparons les visites virtuelles dans des maisons meublées et des maisons non meublées. Par ailleurs, nous souhaitons étudier le comportement des utilisateurs en fonction de leur profil cognitif **VAK**. Plus particulièrement, nous souhaitons examiner et vérifier l'influence du profil cognitif **VAK** sur l'estimation des distances en EV.

Avant de présenter le protocole expérimental mis en place, nous détaillons nos motivations de départ et le choix des facteurs.

5.1 Les facteurs identifiés et motivations

Dans l'état de l'art des facteurs influant la perception des distances (chapitre 2), nous avons conclu que la combinaison de certains facteurs peut conduire à une bonne estimation des distances et que le choix de ces facteurs dépend des fonctionnalités et des besoins de l'outil de RV.

Dans le contexte de la revue de projet, nous avons identifié trois facteurs de base dont deux sont liés à l'EV et font partie de la catégorie des facteurs compositionnel définie dans le chapitre 2 : la vitesse de navigation et la scène virtuelle et un facteur externe humain qui est le profil cognitif **VAK** des utilisateurs. Par cette étude expérimentale nous visons à trouver les paramètres les plus adaptés aux visites virtuelles de maisons (présence, mal du simulateur, etc.) et les meilleurs pour l'estimation des distances.

5.1.1 La vitesse de navigation

Lors d'un déplacement, la distance parcourue nous donne des informations sur la taille de l'environnement. Cependant, les dispositifs d'affichage comme les grands écrans ne permettent pas de naviguer en marchant physiquement, contrairement aux HMDs ou à la vraie vie. En conséquence, certaines informations importantes, susceptibles d'améliorer l'estimation des distances en EV, sont perdues. En effet, la marche physique, en plus de l'information visuelle, procure les informations proprioceptive et vestibulaire (liées au corps) permettant de recalibrer la perception des distances en EV et d'améliorer l'estimation des distances [RW07, KHSS14]. La navigation par la marche physique semble meilleure pour l'estimation des distances [WR08]. Par ailleurs, en l'absence d'information proprioceptive fournie par la marche physique, les personnes se basent sur l'information visuelle plus que sur l'information vestibulaire pour estimer les distances [CBB12].

Dans notre EV où la navigation est contrôlée à l'aide d'une *wiimote*, le flux optique (information visuelle) qui représente le fait de voir les objets se déplacer autour de la personne en déplacement passive sera utilisé pour l'estimation des distances. La position des objets autour de la personne en déplacement

(loin ou près) et leur vitesse de mouvement qui est liée à la vitesse de navigation offre des informations aidant à l'estimation des distances [RKSB13]. Par conséquent, le flux optique lié à la vitesse peut être un facteur dans l'estimation des distances. Toutefois, la vitesse est aussi mal perçue en EV. En effet, dans le travail de Palmisano *et al.* [Pal02], elle est perçue comme rapide. De ce résultat, il découle que l'utilisation d'une vitesse normale de marche pour la navigation en EV risque de biaiser l'estimation des distances car elle sera perçue comme rapide.

En plus de ces résultats, habituellement, nous marchons plus doucement dans des endroits fermés (des maisons) que dans un environnement extérieur. Par ailleurs, le contexte de la marche peut aussi faire varier la vitesse de la marche, par exemple la vitesse de marche pour visiter un lieu ou pour se promener n'est pas la même que pour aller travailler. Typiquement, nous marchons moins vite lorsque nous visitons un lieu. Pour toutes ces raisons nous étudions trois vitesses de navigation afin de choisir la valeur la plus appropriée à notre contexte.

5.1.2 L'ameublement des maisons

Dans le domaine architectural, l'ameublement intérieur de maison influence la perception de l'espace intérieur [Ima73]. La présence de meubles peut aider à mieux se projeter dans la maison. Cependant, il se peut qu'il ne soit pas au goût de tout le monde et peut donc influencer la prise de décision des clients. Le risque est qu'ils jugent le plan de la maison en s'appuyant sur le design intérieur utilisé, plutôt que sur les dimensions effectives des différentes pièces.

Par ailleurs, les meubles ont des tailles standards qui sont généralement connues. Par conséquent, les meubles sont des indices d'échelle qui peuvent influencer l'estimation des distances en EV. Dans le cadre de notre projet, il est donc important de connaître l'influence de l'ameublement sur l'estimation des distances. Pour cette raison, nous examinons la présence de meubles dans les maisons.

5.1.3 Le profil cognitif

La méthode d'apprentissage d'un individu est liée à ses capacités de perception sensorielle et peut donc influencer la manière d'appréhender l'environnement virtuel d'un individu et conduire à des différences dans l'estimation des distances et des volumes. Un questionnaire [CC05] permet de déterminer le profil cognitif VAK (Visuel, Auditif et Kinesthésique) d'un individu, caractérisé par une préférence des modalités sensorielles : visuelle, auditive ou kinesthésique [HC11]. Nous reprenons les définitions des profils comme dans [HC11]. Le profil visuel caractérise les personnes qui apprennent en observant. Ces personnes pensent souvent sous forme d'images et apprennent le mieux grâce à des éléments visuels comme les cartes et les graphiques [RSD78]. Le profil auditif caractérise les personnes qui comprennent et apprennent par l'écoute. Ces personnes réagissent bien aux discussions et aux situations qui donnent l'occasion de discuter et d'écouter. Le profil kinesthésique caractérise les personnes qui apprennent par l'expérience et l'exécution de tâches. Les situations pratiques d'apprentissage leur conviennent le mieux.

Dans un contexte d'apprentissage, le profil cognitif influence l'utilisation et le bénéfice de l'environnement virtuel en fonction des caractéristiques de ce dernier et du profil cognitif [HC11]. En effet, Hauptman et Cohen ont trouvé que l'apprentissage en utilisant l'environnement virtuel s'améliore davantage pour le profil visuel que les profils auditif et kinesthésique. Ce résultat est probablement lié au fait que l'information visuelle est la caractéristique la plus présente dans l'environnement virtuel utilisé. Cependant, davantage de travaux sont nécessaires pour éclaircir ce résultat et pour confirmer son interprétation.

Dans un environnement de revue de projet architectural, on peut travailler sur ces trois dimensions : visuel (travail sur texture, éclairage, etc.), kinesthésique (travail sur interaction), auditif (travail sur retour sonore). Pour savoir s’il est important de travailler sur l’un ou l’autre aspect, nous essayons de savoir si le profil cognitif peut avoir un impact sur la perception des distances et quel aspect privilégier lors de la conception de l’EV.

5.2 Protocole expérimental

Dans notre étude, les participants visitent des maisons virtuelles et estiment les dimensions (largeur, profondeur) et l’habitabilité. Cette dernière représente le confort de vie dans une pièce. Les maisons sont à l’échelle 1 :1. Nous examinons les trois facteurs : la vitesse de navigation, l’ameublement et le profil cognitif.

5.2.1 La méthode

Nous testons deux environnements : maison meublée et maison non meublée. Dans les maisons meublées nous définissons trois vitesses, une pour chaque groupe : une vitesse normale de marche, 1.1 m/s, comme indiqué dans les travaux précédents [FFW07], une vitesse lente de marche, 0.55 m/s, qui est la moitié de la vitesse normale [GL13], et une vitesse dynamique. Pour cette dernière, la vitesse varie entre lente et normale, selon le dégagement de l’espace. Dans les maisons non meublées, nous utilisons uniquement les vitesses lente et normale pour chaque groupe en raison de l’absence de meubles, comme résumé dans la table 5.1.

Pour la vitesse dynamique, nous avons mis en place une technique modulant la vitesse en fonction du nombre de meubles qui entourent l’utilisateur et de la distance qui le sépare des meubles. Lorsque la visite virtuelle commence, la vitesse est fixée à une vitesse normale (1,1 m/s). Une fois la navigation lancée, si l’utilisateur est entouré de deux objets ou plus, et que ces meubles se trouvent à une distance de 35 cm ou moins de la position de l’utilisateur, alors la vitesse diminue pour atteindre une vitesse lente. Ensuite, plus l’utilisateur s’éloigne des objets (> 35 cm) et se déplace dans un espace dégagé comme dans un couloir, plus la vitesse augmente jusqu’à atteindre une vitesse de marche normale.

En résumé, les variables indépendantes pour cette étude sont la vitesse de navigation, l’ameublement et le profil cognitif (VAK). Les variables dépendantes sont l’estimation des distances, la perception des tailles, l’habitabilité, et la difficulté de la tâche. Nous avons également analysé l’effet de la vitesse, le VAK et le l’ameublement sur la présence, le mal du simulateur et la réalisation d’une carte cognitive.

Conditions, vitesse	Lente	Normale	Dynamique
Meublée	G1	G2	G3
Non meublée	G4	G5	X

TABLE 5.1: 5 conditions expérimentales, un groupe de participant par condition.

5.2.2 Matériel et stimuli visuels

L’étude expérimentale s’est déroulée dans la salle de RV *In Virtuo* au laboratoire ICube. Elle est constituée d’un mur immersif (3m × 2.25m) permettant un affichage stéréoscopique actif. Le taux de

rafraîchissement stéréoscopique est de 60HZ par œil. Pour la vision 3D les participants portent des lunettes de type CrystalEyes CE-2. Le mur immersif offre un champ de vision horizontal de 90° et vertical de 70°. Nous avons utilisé un système de suivi basé sur 6 caméras pour la capture des mouvements de l'utilisateur dans un espace de 6 m². Le système de suivi permet le suivi de la position des lunettes 3D (pour le changement de point de vue) et du dispositif d'interaction *Nintendo Wiimote*. Dans l'EV, grâce au système de suivi, la hauteur de la caméra est adaptée automatiquement à la hauteur des yeux des participants.

Dans le cadre pratique de notre projet architectural, mesurer la distance interoculaire pour chaque client induirait un temps supplémentaire à chaque visite. Pour cette raison, sachant que la distance interoculaire pour les adultes est limitée dans l'intervalle (50 - 70 mm) [Dod04], dans notre expérimentation, la distance interoculaire est fixée à la moyenne standard de 63 mm pour tous les participants.

Notre programme a été développé en C++ et est basé sur la librairie VRJuggler pour la gestion des périphériques.

Nous avons modélisé huit scènes qui correspondent à des plans de maisons réelles ; quatre scènes pour chaque condition. Quatre modèles sont complètement meublés (lits, canapé, table, chaises, etc.). Pour la condition meublée, deux maisons sont de type T2, avec des superficies de 45 et 52 m², et les deux autres sont de type T3, avec des superficies de 65 et 58 m². Nous avons utilisé quatre maisons non meublées, contenant uniquement des éléments de base comme les toilettes, le lavabo, les portes. Deux maisons sont de type T2, avec des superficies de 47 et 45 m², et les deux autres sont de type T3, avec des superficies de 76 et 69 m². Les scènes virtuelles ont été modélisées en respectant les mesures des plans. Pour avoir des environnements réalistes, nous avons appliqué des textures sur toutes les scènes. L'éclairage a été précalculé avec 3DS Max pour éviter la latence.

5.2.3 Participants

Cinquante volontaires ont participé à cette expérience, 39 hommes et 11 femmes entre 19 et 32 ans, avec une moyenne d'âge de 23 ans. Les participants sont des étudiants en informatique de notre université. Tous ont une vision normale ou corrigée. Les participants n'ont pas d'expérience précédente dans des EVs. Les participants sont distribués de manière équitable sur les 5 conditions, 10 sujets par groupe, comme résumé dans le tableau 5.1.

5.2.4 Mesures et évaluation du questionnaire de compréhension spatiale (CS)

Pour examiner l'influence du profil cognitif, nous avons utilisé le questionnaire VAK pour classer les sujets selon les trois profils : visuel, auditif, kinesthésique.

Au cours de cette étude, nous avons évalué principalement l'estimation des distances et des volumes des pièces avec le questionnaire de compréhension spatiale (introduit dans le chapitre 4, pour plus de détails et d'exemples veuillez vous référer à la sous-section 4.3.1). Pour le confort des futurs utilisateurs, nous avons mesuré le niveau de présence et le mal du simulateur.

Questionnaire de compréhension spatiale (CS)

La première partie du questionnaire de compréhension spatiale (CS1) mesure quatre éléments :

1. Estimation des distances (ED) : nous avons calculé l'écart entre la distance correcte et la réponse donnée. Par exemple, dans la question suivante :

Parmi les propositions suivantes, choisissez la largeur de la pièce : a) 3.5, b) 4, c) 4.5, d) 5 m.

Si la bonne réponse est c) et que le participant choisi plutôt la réponse b) l'écart est de -1, s'il choisi la réponse a) en l'occurrence l'écart est de -2.

L'estimation est parfaite si l'écart est nul, s'il est positif, la distance est surestimée, sinon elle est sous-estimée. Les valeurs proposées dans les choix ont été calculées avec un écart de 15% par rapport à la bonne valeur. Ce pourcentage a été choisi pour s'assurer que la différence entre les valeurs est supérieure au seuil minimal de différence perceptible pour les distances 3D [DSFW⁺10].

2. Perception des tailles et habitabilité : nous avons utilisé le même principe que pour l'ED, nous avons calculé l'écart entre la réponse correcte et la réponse donnée. Par exemple, dans la question suivante :

Si vous deviez rajouter une table à manger rectangulaire de quatre personnes (deux sur chaque côté) entre le canapé et la cuisine, pensez-vous que l'espace serait : 1) insuffisant, 2), 3), 4), 5), 6), 7) très suffisant.

Si la bonne réponse se trouve à la position 3) de l'échelle et que le participant choisi plutôt la position 5) l'écart est de 2 (5-3), par contre s'il choisit la position 1), l'écart est de -2 (1-3).

Si l'écart est nul l'estimation est correcte. Si il est positif, alors l'évaluation est surestimée, sinon elle est sous-estimée.

En l'occurrence, nous ne pouvons pas donner un pourcentage à la sous/surestimation, car les bonnes réponses pour ces deux catégories de questions ont été calculées avec les architectes en se basant sur différentes normes de construction. En conséquence, l'écart dans l'échelle d'une question n'a pas forcément la même signification que les autres questions. Toutefois, l'écart peut indiquer l'amplitude de la sous/surestimation ainsi, plus l'écart est grand (positif ou négatif) plus la sous/surestimation est importante.

3. Difficulté de la tâche : nous avons évalué la difficulté de la visite virtuelle (incluant l'estimation des distances) sur une échelle de Likert de 7, où 7 est la difficulté maximale.

Quelques exemples de questionnaires sont présentés en annexe A.

La méthode de construction du questionnaire ne permettait pas de traiter les questions individuellement, puisque les échelles de réponse ne sont pas comparables entre les groupes de questions. C'est pourquoi nous avons choisi, pour chaque sujet, de calculer la moyenne des écarts à la bonne réponse par groupe de question. Ceci présente l'avantage de lisser la possibilité de dérive sur l'ensemble des questions présentées à chaque sujet.

Les réponses proposées aux sujets ayant été construites de façon à ce que les possibilités d'écart proposées soient identiques pour chacun, nous avons considéré que cet indicateur était suffisant pour comparer, entre les sujets, les tendances à la sous ou à la sur-estimation. Une autre possibilité pour l'évaluation aurait été de baser notre analyse sur une étude des fréquences de réponses. Toutefois, cette approche nous semblait moins adaptée, du fait de la répartition inhomogène des réponses (moins de réponses possibles à +2 et -2 qu'à +1 et -1).

La deuxième partie du questionnaire (CS2) mesure la compréhension du plan :

- La carte cognitive (CS2) : Après chaque visite les participants devaient dessiner le plan de la maison, en notant la désignation des pièces (séjour, chambre, etc). Sur ce plan, ils devaient aussi dessiner le chemin de navigation suivi. Le plan de la maison et le chemin de navigation ont été évalués relativement à, 1) le nombre et la fonctionnalité des pièces, 2) leur forme, 3) leur agencement, 4)

les proportions et 5) l'ordre de la visite. Par cette tâche nous avons évalué la compréhension de l'espace visité avec une note subjective sur 5, où 5 est la meilleure note, en attribuant un point pour chaque élément cité. Par exemple, pour le nombre de pièces, si une pièce manque sur le plan nous avons attribué un demi point (0.25). D'autres exemples de notation sont proposés en Annexe B.

À noter que pour le CS2, même en l'absence de meubles, le questionnaire CS1 donne assez d'indications sur la fonctionnalité des pièces (séjour, cuisine, chambre, etc.) , comme le montre la question suivante.

Exemple : *Si vous deviez aménager la chambre comme une chambre parentale avec un grand lit double et deux tables de chevet, que vous placez sur le mur de la fenêtre, vous pensez que l'espace serait : 1) insuffisant, 2), 3), 4), 5), 6), 7) très suffisant.*

En conséquence, nous considérons que la visite virtuelle complétée des questions du CS1 permet de construire la carte cognitive sur le plan.

La présence (QP)

Nous avons évalué le niveau de présence des participants avec le questionnaire standard de Witmer et Singer [WS98] traduit en français par le Laboratoire de Cyberpsychologie de l'Université du Québec en Outaouais (UQO) [dQeOU02b]. Le questionnaire est constitué de 16 questions sur une échelle de 7, avec 7 étant un niveau de présence élevé. Nous avons utilisé ce questionnaire pour examiner l'influence de la présence sur la tâche d'estimation des distances et sur la visite virtuelle.

Le mal du simulateur (SSQ)

Nous avons évalué le mal du simulateur avec le questionnaire standard (SSQ) développé par Kennedy et ses collègues [KLBL93] traduit en français par le Laboratoire de Cyberpsychologie de l'Université du Québec en Outaouais (UQO) [dQeOU02a]. Le questionnaire est constitué de 16 questions sur une échelle de 0 à 3. Le questionnaire regroupe trois symptômes : 1) la nausée, 2) fatigue oculaire et 3) la désorientation. Chaque question est évaluée avec un poids pour chaque symptôme. La moyenne pondérée de ces trois facteurs définit le score total (le niveau du mal du simulateur). Ce score correspond à plusieurs degrés comme le montre le tableau 5.2.

Lors des visites virtuelles, les participants ont rempli le questionnaire deux fois : une fois après la première visite (SSQ1) et une deuxième fois après la dernière visite (SSQ2). Dans l'analyse statistique, nous avons examiné d'un côté, l'influence des différentes variables indépendantes sur les symptômes du mal de simulateur à la fin de l'expérimentation soit sur SSQ2. D'un autre côté, l'influence sur l'augmentation du mal du simulateur au cours des visites virtuelles, cette augmentation a été mesurée par la différence entre les deux résultats soit SSQ2 - SSQ1.

L'orientation et la visualisation spatiale

Tous les participants ont effectué le test standardisé de capacité spatiale de Guilford et Zimmerman (tests de GZ) [GUI56] afin d'avoir une indication sur leur habileté en orientation et en visualisation spatiale. Ce test permet de mesurer les capacités humaines et est scindé en six parties, seules les parties 5 et 6 sont utilisées dans notre expérimentation :

- Partie 1 et 2 : Compréhension verbale et raisonnement général.

Score SSQ	Niveau de symptôme
0	aucun symptôme
< 5	symptômes négligeables
5 – 10	symptômes minimaux
10 – 15	symptômes significatifs
15 – 20	symptômes sévères
> 20	mal du simulateur

TABLE 5.2: Les différentes catégories de symptôme du SSQ. Image tirée de [KDC⁺03]

- Partie 3 et 4 : Opération numérique et rapidité de perception.
- Partie 5 et 6 : Orientation spatiale et visualisation spatiale.

Le test d'orientation spatiale, comme son nom l'indique, permet de mesurer l'habilité à percevoir les changements de direction et de position. Dans ce test le participant détermine le changement d'orientation (et donc de position) d'un objet entre 2 images.

Le test de visualisation spatiale permet de mesurer l'habilité à visualiser les positions spatiales. Dans ce test, le participant détermine le changement de position d'un objet se déplaçant selon les mouvements indiqués.

Chaque test est limité à 10 minutes. Le test d'orientation spatiale contient 60 images et le test de visualisation spatiale contient 40 images.

L'espace de confort

De nombreux facteurs externes peuvent entrer en ligne de compte dans l'évaluation de l'habitabilité. La taille des participants par exemple en est un évident, ainsi que l'étendue de leur espace péripersonnel. Nous avons donc tenté au cours de cette expérimentation, pour aborder cette limite, de mettre à jour une éventuelle corrélation entre l'étendue de l'espace péripersonnel des participants et les résultats de l'habitabilité. En conséquence, nous avons mesuré l'espace de confort des participants (en mètre) qui représente le périmètre à partir duquel l'individu se sent gêné par la présence d'une autre personne et nous avons examiné son influence sur l'estimation de l'habitabilité.

5.2.5 Hypothèses

Notre objectif est d'évaluer l'influence des trois facteurs désignés sur les visites virtuelles, notamment sur l'estimation des distances et des volumes. Nous émettons les hypothèses suivantes sur les résultats :

H1 Les personnes avec le profil visuel étant les plus sensibles aux images et aux informations visuelles, ils sont les plus précis dans l'estimation des distances, car l'information visuelle est la plus dominante. En effet, pour les autres profils peu (ou pas) d'informations adaptées sont fournies comme l'exécution de tâches ou des indices auditifs.

H2 Les maisons meublées améliorent l'estimation des distances et des volumes et permettent une meilleure compréhension de l'espace. En effet, les maisons meublées fournissent des indices d'échelle permettant de calibrer l'estimation des distances.

H3 La vitesse lente conduit à une meilleure estimation des distances et des volumes. Car se déplacer lentement dans des pièces fermées offre davantage de temps pour explorer l'environnement et bien

percevoir les distances.

5.2.6 Procédure

Dans cette étude, le sujet visite quatre maisons différentes. La durée des visites virtuelles est d'environ 40 minutes pour les quatre scènes et la durée totale de l'expérience est de 1h20 pour les visites et les questionnaires. L'expérimentation se divise en trois phases comme suit.

Pré-expérience

La session commence par une présentation de l'expérimentation et de l'EV. Le sujet lit attentivement les consignes qui expliquent le déroulement de l'expérience et la méthode de navigation en EV. En outre, il répond au questionnaire VAK.

Après cette présentation, l'utilisateur commence la prise en main ; il effectue une visite virtuelle de la maison pendant quelques minutes, afin de se familiariser avec la technique de navigation et le périphérique d'interaction. La visite commence toujours par l'entrée de la maison, comme dans la réalité, puis passe par le séjour, la cuisine, les chambres, et enfin, la salle de bain et les toilettes. Les participants visitent toutes les pièces de la maison. La visite est effectuée avec une navigation guidée, en suivant un chemin prédéfini, représenté dans la scène virtuelle par un fil d'Ariane vert, comme le montre la figure 5.1. Les sujets utilisent une *wiimote* pour naviguer et ont uniquement la possibilité d'avancer, de s'arrêter, ou de tourner sur eux-mêmes. Pour avancer, les sujets utilisent un bouton de la *wiimote* tandis que pour tourner, ils doivent simplement orienter la *wiimote* dans la direction désirée. Avant de commencer l'expérience, l'expérimentateur montre aux participants un mètre ruban d'un mètre de longueur, pendant 10 secondes, pour que chacun ait un minimum de connaissances métriques afin de répondre aux questions.



FIGURE 5.1: Exemple de visite virtuelle : avec des positions différentes lors de la visite d'une maison meublée. Le chemin de navigation est représenté en fil d'Ariane en vert.

Expérience

Nous avons utilisé une navigation guidée pour s'assurer que les sujets suivent le même chemin et aient à peu près le même temps de navigation. Durant la visite des pièces, et à des endroits bien définis, le sujet entend un bip sonore et se trouve alors bloqué, avec uniquement la possibilité de tourner sur lui-même. À ce moment-là, l'expérimentateur pose les questions de compréhension spatiale et note les réponses données par le participant. Une fois les questions traitées, l'expérimentateur débloque le participant afin

de visiter la pièce suivante. Après la visite de chaque maison, le sujet dessine le plan de la maison et le chemin de navigation.

Post-expérience

Après la première et la dernière visite, le participant répond au questionnaire SSQ. A la fin de l'expérience, il répond au questionnaire de présence et procède au débriefing semi-guidé.

5.3 Résultats

Nous nous trouvons dans le cas d'un plan expérimental inter-groupe. Nous avons dans un premier temps vérifié que nos données remplissaient les conditions de normalité et d'homogénéité des données, en utilisant les tests de Shapiro-Wilk et de Bartlett. Ces conditions étant respectées, nous avons ensuite réalisé une analyse de la variance (ANOVA : ANalysis Of VAriance) multi-factorielle. Lorsque cette dernière révèle un impact significatif d'une variable indépendante, nous effectuons une analyse post-hoc par le test de Tukey HSD (Honestly Significant Difference), afin d'identifier les différences significatives.

Les variables indépendantes pour cette analyse sont la vitesse de navigation, l'ameublement et le profil cognitif (VAK). Les variables dépendantes sont l'estimation des distances, la perception des tailles, l'habitabilité et la difficulté de la tâche. Nous avons également analysé l'effet de la vitesse, le VAK et la condition d'ameublement sur la PQ, CS2, SSQ2 et l'augmentation du SSQ. En outre nous avons examiné l'influence de l'espace de confort sur l'habitabilité.

Dans l'ensemble des études que nous menons, nous utilisons le seuil de signification classique : $p\text{-value} < 0,05$ pour un résultat significatif.

L'analyse statistique a révélé une variété de résultats que nous résumons dans le tableau 5.3, ce dernier représente la signification de l'influence des variables indépendantes sur les variables dépendantes et sur la carte cognitive (CS2), la présence (PQ), le SSQ final (SSQ2) et l'augmentation du mal du simulateur au cours des visites (SSQ2- SSQ1). Les valeurs en gras représentent les résultats significatifs. Aucune interaction n'a été trouvée entre les facteurs : la vitesse de navigation, l'ameublement et le profil cognitif.

Conditions expérimentales		Estimation des distances	Perception des tailles	Habitabilité	Difficulté de la tâche	CS2	QP	SSQ2	Augmentation SSQ
VAK	$F(2,47)$	6.369	2.529	0.119	4.844	3.35	9.042	1.516	0.173
	$p\text{-value}$	0.002	0.082	0.887	0.009	0.037	<0.001	<0.005	0.325
La vitesse	$F(2,47)$	4.796	0.351	0.569	5.871	0.923	7.190	0.051	0.235
	$p\text{-value}$	0.009	0.704	0.567	0.003	0.399	<0.001	0.869	0.400
Ameublement	$F(1,48)$	0.197	1.356	5.721	1.702	5.271	0.089	0.995	0.012
	$p\text{-value}$	0.657	0.245	0.018	0.193	0.023	0.766	0.076	0.293

TABLE 5.3: Tableau résumant la signification de l'influence des variables indépendantes sur les variables dépendantes et sur la carte cognitive (CS2), la présence (PQ), le SSQ2 et l'augmentation du mal du simulateur. Les valeurs en gras de F et $p\text{-value}$ représentent les résultats significatifs.

Nous présentons le résultat global concernant les tendances dans les estimations puis, nous abordons les résultats par variable indépendante.

5.3.1 Les tendances dans les estimations

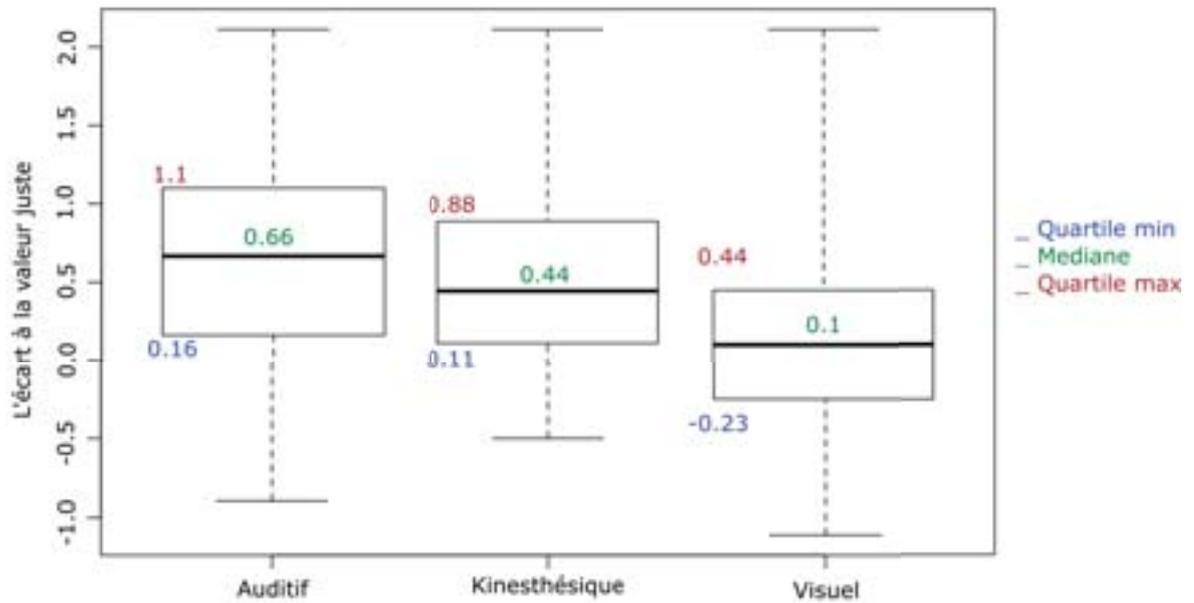


FIGURE 5.2: Boîte à moustache représentant la distribution de l'estimation des distances en fonction du profil cognitif VAK.

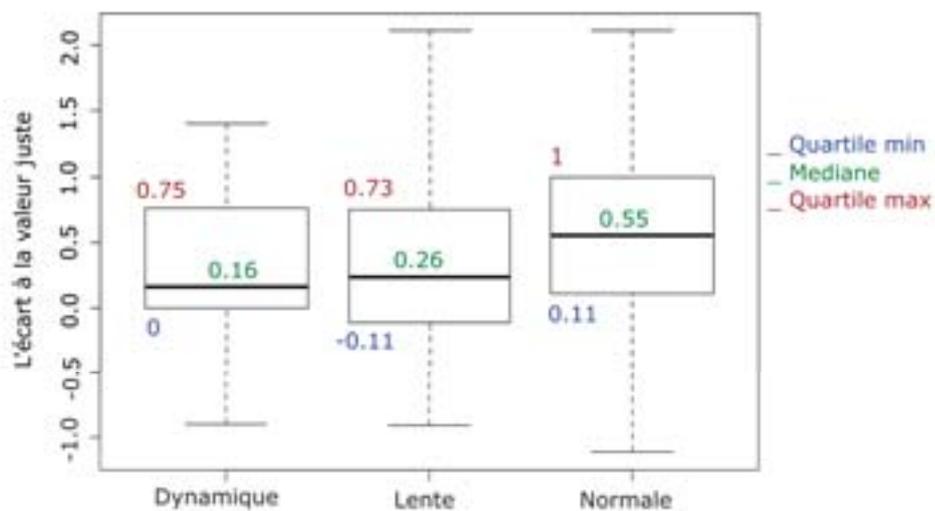


FIGURE 5.3: Boîte à moustache représentant la distribution de l'estimation des distances en fonction de la vitesse.

Dans cette sous section nous parlons des tendances dans l'estimation des distance, la perception des tailles et l'habitabilité de manière globale dans toutes les conditions.

Dans l'analyse des résultats de l'estimation des distances, nous avons calculé l'écart entre la distance correcte et la réponse donnée. Puisque pour certaines questions la bonne réponse peut être la valeur de la

première ou de la quatrième proposition, l'écart de la sous/surestimation peut aller jusqu'à -3 ou +3. Dans toutes les conditions, les dimensions des pièces sont surestimées. En effet, les valeurs sont distribuées au dessus de zéro (voir les figures 5.2, 5.3), avec quasiment 50% des valeurs entre 0 et 1 ce qui signifie une légère surestimation.

Par ailleurs, puisque les valeurs des différentes propositions ont été calculées avec une sous/surestimation de 15 % par rapport à la bonne valeur, ce dernier résultat montre que la surestimation est, en général, de l'ordre de 15% (écart entre les valeurs 0 et 1), du fait de la construction du questionnaire

Dans l'analyse des résultats de la perception des tailles et de l'habitabilité, nous avons calculé l'écart entre la réponse correcte et la réponse donnée. Contrairement à l'estimation des distances, les valeurs globales de la perception des tailles et de l'habitabilité révèlent une tendance des sujets à sous-estimer les tailles et l'habitabilité des pièces comme le montrent les figures 5.4, 5.5, pour la perception des tailles et l'habitabilité, respectivement.

Toutefois, puisque un écart ne représente pas un pourcentage particulier, car chaque question est évaluée selon une norme de construction spécifique, nous ne pouvons pas donner un pourcentage à la sous/surestimation trouvée. L'écart peut indiquer uniquement l'amplitude de la sous/surestimation, c'est à dire que plus l'écart est grand plus la sous-estimation est importante. Comme, pour certaines questions la bonne réponse peut être la position 7 ou la position 1 de l'échelle, l'écart de la sous/surestimation peut aller jusqu'à -6 ou +6. Par conséquent, comme nous l'avons remarqué sur les figures 5.4, 5.5 les valeurs moyennes de la perception des tailles et de l'habitabilité sont globalement distribuées entre 0 et -2 ce qui signifie une légère sous-estimation de la perception des tailles et de l'habitabilité, avec plus de précision dans l'habitabilité.

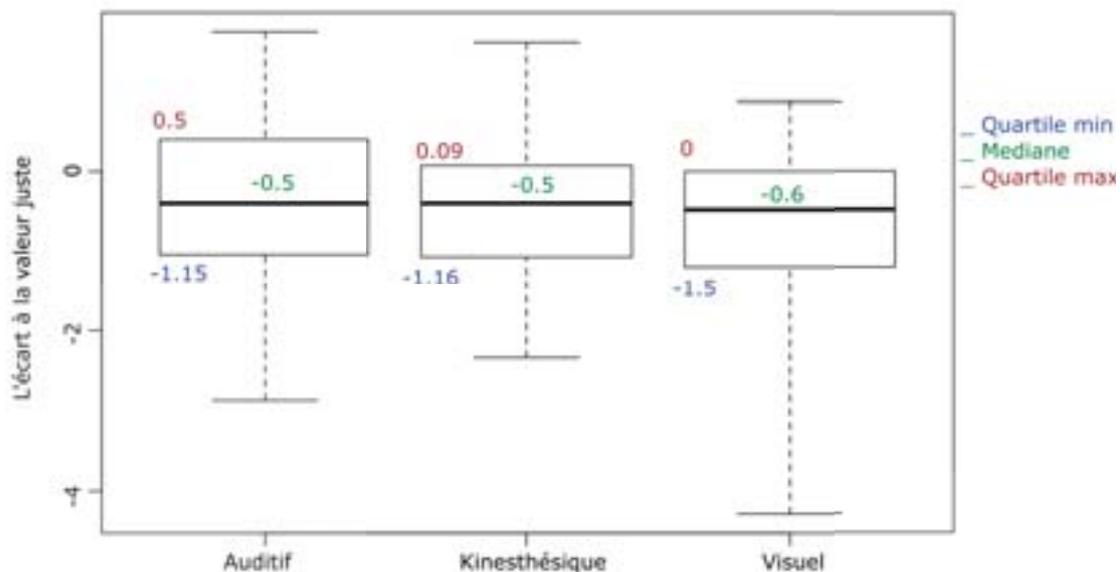


FIGURE 5.4: Boite à moustache représentant la distribution de la perception des tailles en fonction du profil cognitif VAK.

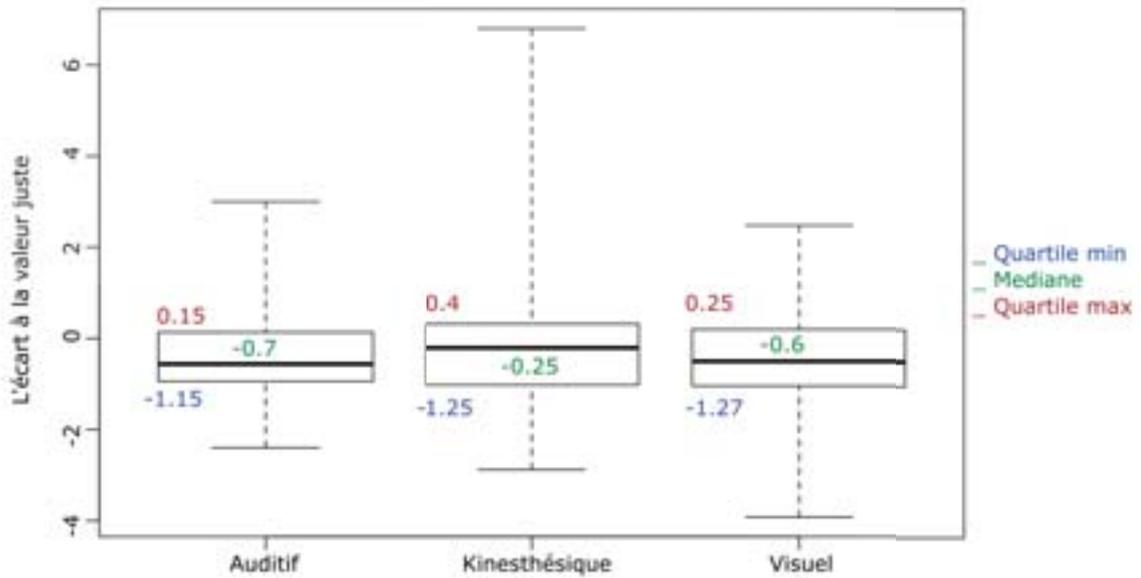


FIGURE 5.5: Boite à moustache représentant la distribution de l'habitabilité en fonction du profil cognitif VAK.

5.3.2 Profil cognitif

Nous exposons d'abord les résultats concernant le profil cognitif afin de présenter la distribution des différents profils cognitifs sur les conditions expérimentales. Le résultat du questionnaire VAK révèle que nous avons 18 sujets de profil visuel, 15 sujets de profil auditif et 17 sujets de profil kinesthésique. Le tableau 5.4 montre la distribution des différents profils cognitifs sur les cinq conditions expérimentales. Puisque nous n'avons trouvé aucune interaction entre les variables dépendantes, nous n'avons pas étudié l'influence de la distribution du profil VAK sur les groupes.

Profil cognitif, Conditions	D	N	L	Meublée	Non meublée
Visuel	3	6	9	9	9
Auditif	4	5	6	10	5
Kinesthésique	3	8	6	11	6

TABLE 5.4: Distribution du profil cognitif sur les variables indépendantes : la vitesse (D : dynamique, N : normal, L : lente) et l'ameublement.

Le tableau 5.5 montre l'influence du profil cognitif sur les variables dépendantes et sur la carte cognitive, la présence et le mal du simulateur.

Estimation des distances

Le tableau 5.5 reporte la valeur moyenne des écarts à la bonne valeur. L'analyse montre une influence significative du profil VAK ($F(2, 47) = 6.369$, $p\text{-value} = 0.002$) sur l'estimation des distances. Les comparaisons paire-à-paire ont montré que les participants au profil visuel sont significativement meilleurs

VAK	Estimation des distances	Perception des tailles	Habitabilité	Difficulté de la tâche	CS2	QP	SSQ2	Augmentation SSQ
A	0.612	-1.000	-0.907	5.054	4.151	4.507	7.247	2.167
K	0.569	-1.014	-0.679	4.166	3.937	4.275	10.043	2.634
V	0.145	-1.996	-1.202	4.883	3.483	4.166	10.970	3.099
$F(2,47)$	6.369	2.529	0.119	4.844	3.35	9.042	1.516	0.173
p -value	0.002	0.082	0.887	0.009	0.037	<0.001	<0.005	0.325

TABLE 5.5: Valeur moyenne, valeurs de F et p -value qui montrent l'influence du profil VAK : auditif (A), kinesthésique (K) et visuel (V) sur les variables dépendantes et sur la carte cognitive (CS2), la présence (QP), le SSQ2 et l'augmentation du SSQ. Les valeurs en gras représentent les résultats significatifs.

que les auditifs (p -value = 0.005) et kinesthésiques (p -value = 0.046), avec moins de surestimation, comme le montre la figure 5.2.

Aucune différence significative n'a été trouvée entre les kinesthésiques et les auditifs (p -value = 0.78) avec une moyenne des écarts de 0.569 et 0.612, respectivement.

Perception des tailles

Le tableau 5.5 reporte la valeur moyenne des écarts à la bonne réponse. Le profil VAK n'a pas d'influence significative sur la perception des tailles ($F(2, 47) = 3.529$, p -value = 0.082).

Habitabilité

Semblablement, les valeurs sur le tableau 5.5 représente la valeur moyenne des écarts à la bonne réponse. Le profil VAK n'a pas d'influence significative sur l'habitabilité ($F(2, 47) = 0.119$, p -value = 0.887).

La difficulté de la tâche

Les valeurs rapportées dans le tableau 5.5 représentent l'évaluation moyenne de la difficulté de la tâche sur une échelle de Likert de 1 à 7. En moyenne, cette dernière a été estimée comme étant relativement élevée, avec une valeur globale moyenne de 4.77/7.

Le résultat montre que le profil VAK ($F(2, 47) = 4.844$, p -value = 0.009) a une influence significative sur l'estimation subjective de la difficulté de la tâche.

Les comparaisons paire-à-paire ont montré que les participants avec les profils visuel (p -value = 0.020) et auditif (p -value = 0.042) ont évalué la difficulté de la tâche comme étant plus difficile, avec une valeur moyenne de 4.883 et 5.054 respectivement, que ceux au profil kinesthésique (4.166), comme le montre le tableau 5.5. La différence entre les visuels et les auditifs n'est pas significative (p -value = 0.988).

La carte cognitive

Les valeurs rapportées dans le tableau 5.5 représentent une note moyenne sur 5 (entre 0 et 5) où 5 représente une carte cognitive précise. L'analyse montre une influence significative du profil VAK sur la carte cognitive ($F(2, 47) = 3.35$, p -value = 0.037).

Les sujets à profil auditif ont un résultat significativement meilleur que les visuels (p -value = 0.055), avec des notes de 4.151 et 3.483, respectivement. Cependant, les comparaisons paire-à-paire n'ont révélé

aucune différence significative entre les participants à profil visuel et kinesthésique ($p\text{-value} = 0.16$) et kinesthésique et auditif ($p\text{-value} = 0.85$).

Mal du simulateur (SSQ) et présence (QP)

Les valeurs moyennes du SSQ2 révèlent des symptômes minimaux (entre 5-10) à légèrement significatif (entre 10-15) à la fin de l'expérimentation. L'analyse statistique montre une influence significative du profil cognitif sur le mal du simulateur ($F(2, 47) = 1.516, p\text{-value} < 0.005$). Les comparaisons paire-à-paire ont montré une différence significative entre le profil visuel et auditif ($p\text{-value} < 0.005$). Les participants au profil visuel ont des symptômes légèrement significatifs avec une moyenne de 10.97 tandis que les participants à profil auditif ont des symptômes minimaux avec une moyenne de 7.247, comme le montre le tableau 5.5. Aucune différence significative n'a été trouvée entre les participants à profil visuel et kinesthésique ($p\text{-value} = 0.267$) et kinesthésique et auditif ($p\text{-value} = 0.066$).

Les résultats de l'augmentation du SSQ rapportés dans le tableau 5.5 correspondent à la différence des résultats entre le premier SSQ et le dernier. Ces résultats permettent d'évaluer le comportement dans l'augmentation du mal du simulateur au cours des visites entre les différents profils. Les résultats ne montrent aucune influence significative du profil VAK sur l'augmentation du mal du simulateur ($F(2, 47) = 0.173, p\text{-value} = 0.325$).

Par ailleurs, le profil VAK a une influence significative sur la présence (PQ), avec $F(2, 47) = 9.042, p\text{-value} < 0.001$. Les comparaisons paire-à-paire du profil VAK ont montré que le niveau de présence atteint par les participants avec le profil visuel est significativement plus faible ($p\text{-value} = 0.02$) que celui des participants avec le profil auditif. La différence entre les participants avec le profil kinesthésique et auditif est proche de significatif avec une valeur faible de p ($p\text{-value} = 0.053$). Aucune différence n'a été trouvée entre le profil visuel et kinesthésique ($p\text{-value} = 0.936$).

5.3.3 Vitesse de navigation

Vitesse	Estimation de distance	Perception des tailles	Habitabilité	Difficulté de la tâche	CS2	QP	SSQ2	Augmentation SSQ
Dynamique	0.303	-1.294	-0.604	5.19	3.944	4.088	9.736	1.181
Lente	0.376	-1.514	-1.355	4.48	3.958	4.351	9.705	3.027
Normale	0.575	-1.194	-0.649	4.64	3.680	4.387	9.106	2.671
$F(2,47)$	4.796	0.351	0.569	5.871	0.923	7.190	0.051	0.235
$p\text{-value}$	0.009	0.704	0.567	0.003	0.399	<0.001	0.869	0.400

TABLE 5.6: Valeur moyenne, valeurs de F et $p\text{-value}$ qui montrent l'influence de la vitesse sur les variables dépendantes et sur la carte cognitive (CS2), QP, SSQ2 et l'augmentation du SSQ. Les valeurs en gras représentent les résultats significatifs.

Estimation des distances

L'analyse montre une influence significative de la vitesse ($F(2, 47) = 4.796, p\text{-value} = 0.009$) sur l'estimation des distances.

Les comparaisons paire-à-paire révèlent une différence significative entre les vitesses *normale* et *lente* ($p\text{-value} = 0.046$) et *normale* et *dynamique* ($p\text{-value} = 0.021$). Aucune différence significative n'a été trouvée entre les vitesses *lente* et *dynamique* ($p\text{-value} = 0.780$) comme le montre la figure 5.3. L'ensemble de la surestimation des distances est significativement moins important avec les vitesses *dynamique* et *lente* comparées à la vitesse *normale*, comme le montrent les valeurs moyennes dans le tableau 5.6.

Perception des tailles et d'habitabilité

La vitesse de navigation n'a pas d'influence significative sur la perception des tailles ($F(2, 47) = 0.351$, $p\text{-value} = 0.704$) et sur l'habitabilité ($F(2, 47) = 0.569$, $p\text{-value} = 0.567$)

La difficulté de la tâche

La vitesse a une influence significative sur l'estimation subjective de la difficulté de la tâche ($F(2, 47) = 5.871$, $p\text{-value} = 0.003$).

L'utilisation de la vitesse dynamique augmente la difficulté de la tâche. Les comparaisons paire-à-paire ont montré une différence significative entre les vitesses dynamique et lente ($p\text{-value} = 0.004$), et dynamique et normale ($p\text{-value} = 0.033$). Cependant, la différence entre les vitesses lente et normale n'est pas significative ($p\text{-value} = 0.732$).

La carte cognitive

La vitesse n'a aucune influence significative sur la carte cognitive ($F(2, 47) = 0.923$, $p\text{-value} = 0.399$). Tous les participants ont réussi à créer une carte cognitive assez précise du plan des maisons. Les notes moyennes obtenues sont supérieures à la note moyenne de 2.5 (5 étant la meilleure note).

Mal du simulateur et la présence

Concernant le SSQ2, l'analyse statistique ne révèle aucune influence significative de la vitesse sur le mal du simulateur à la fin des visites virtuelles ($F(2, 47) = 0.051$, $p\text{-value} = 0.869$). Quelque soit la vitesse de navigation, les participants ont des symptômes minimaux < 10 .

De même, la vitesse de navigation ne semble pas avoir d'impact significatif sur l'augmentation du SSQ aux cours des visites ($p\text{-value} = 0.400$). Les symptômes semblent augmenter légèrement de la même manière avec les trois vitesses.

En revanche, la vitesse a une influence significative sur la présence ($F(2, 47) = 5.871$, $p\text{-value} = 0.003$). Le niveau de présence atteint par les participants est significativement moindre avec la vitesse dynamique qu'avec les vitesses lente ($p\text{-value} = 0.015$) et normale ($p\text{-value} = 0.012$). Aucune différence n'a été trouvée entre les vitesses lente et normale ($p\text{-value} = 0.992$).

5.3.4 L'ameublement des maisons

Estimation des distances

Contrairement à nos attentes, la condition d'ameublement n'a pas d'influence significative sur l'estimation des distances ($F(1, 48) = 0.197$, $p\text{-value} = 0.657$). Les dimensions des murs sont surestimées de manière semblable dans les maisons meublées et les maisons non meublées.

Condition d'ameublement	Estimation des distances	Perception des tailles	Habitabilité	Difficulté de la tâche	CS2	QP	SSQ2	Augmentation SSQ
Meublée	0.411	-1.138	-1.253	4.699	4.046	4.314	10.239	2.587
Non meublée	0.474	-1.645	-0.468	4.680	3.565	4.306	8.400	2.731
$F(1,48)$	0.197	1.356	5.721	1.702	5.271	0.089	0.995	0.012
p -value	0.657	0.245	0.018	0.193	0.023	0.766	0.076	0.293

TABLE 5.7: Valeur moyenne, valeurs de F et p -value qui montrent l'influence de la condition d'ameublement sur les variables dépendantes et sur la carte cognitive (CS2), QP, SSQ2 et l'augmentation du SSQ. Les valeurs en gras représentent les résultats significatifs.

Perception des tailles

De même pour la perception des tailles, la condition d'ameublement n'a pas d'influence significative sur la perception des tailles ($F(1, 48) = 1.356$, p -value = 0.245).

L'habitabilité

La seule variable indépendante qui a une influence significative sur l'habitabilité est l'ameublement ($F(1, 48) = 5.721$, p -value = 0.018). Les participants ont tendance à moins sous-estimer les volumes avec les maisons non meublées qu'avec les maisons meublées (p -value = 0.044).

La difficulté de la tâche

L'ameublement n'a aucune influence sur la difficulté de la tâche ($F(1, 48) = 1.702$, p -value = 0.193). Contrairement à nos attentes, avoir des meubles dans la maison n'a pas été perçu par les participants comme un élément aidant pour l'estimation des distances et la visite virtuelle.

La carte cognitive

L'analyse statistique a montré que l'ameublement a une influence significative sur la carte cognitive ($F(1, 48) = 5.271$, p -value = 0.023).

Les comparaisons paire-à-paire montrent que les sujets qui ont visité les maisons meublées ont obtenu une note moyenne (4.046/5) meilleure que les sujets qui ont visité les maisons non meublées (3.565/5).

Mal du simulateur et présence

L'analyse statistique ne révèle pas une influence significative mais uniquement une tendance de l'ameublement sur le SSQ2 ($F(1, 48) = 0.995$, p -value = 0.076). Les participants dans les maisons meublées ont un SSQ2 légèrement plus important que les participants dans les maisons non meublées. Les premiers ont des symptômes légèrement significatifs avec une moyenne de 10.239 tandis que les derniers ont des symptômes minimaux (entre 5-10) avec une moyenne de 8.400.

Concernant l'augmentation du SSQ, l'analyse statistique ne montre aucune influence significative de l'ameublement sur l'augmentation des symptômes au cours des visites ($F(1, 48) = 0.012$, p -value = 0.293). Les symptômes augmentent de manière similaire dans les deux conditions d'ameublement.

Semblablement, l'ameublement n'a pas d'influence significative sur la présence ($F(1, 48) = 0.089$, p -value = 0.766).

5.3.5 L'orientation et la visualisation spatiale

Nous avons étudié la corrélation entre l'orientation spatiale (partie 5 du test du GZ) et les variables dépendantes : *estimation des distances*, *perception des tailles* et *habitabilité* afin d'étudier la relation entre la perception de l'orientation et la perception des distances et des volumes. Aucune corrélation n'a été observée ($p\text{-value} = 0.964$, $p\text{-value} = 0.614$, $p\text{-value} = 0.177$) entre l'orientation spatiale et les trois variables respectivement, avec un coefficient de corrélation presque nul ($r = 0.003$, $r = -0.038$) pour l'*estimation des distances* et la *perception des tailles* et un coefficient $r = 0.102$ pour l'*habitabilité*.

De même, aucune corrélation n'a été observée entre la visualisation spatiale (partie 6 du test du GZ) et les deux variables dépendantes : *estimation des distances* ($p\text{-value} = 0.817$, $r = -0.017$), *perception des tailles* ($p\text{-value} = 0.911$, $r = 0.008$). Toutefois, nous avons observé une corrélation positive entre la visualisation spatiale et l'*habitabilité* ($p\text{-value} = 0.023$) avec un coefficient de corrélation faible $r = 0.171$.

5.3.6 L'espace de confort

De manière similaire, nous avons examiné la corrélation entre l'espace personnel et les trois variables dépendantes : *estimation des distances*, *perception des tailles* et *habitabilité*. Les résultats ne montrent aucune corrélation pour les trois variables ($p\text{-value} = 0.100$, $r = 0.165$), ($p\text{-value} = 0.425$, $r = -0.08$) et ($p\text{-value} = 0.646$, $r = 0.046$) respectivement. Ce résultat, particulièrement, indique qu'aucune relation n'existe entre l'évaluation de l'*habitabilité* et l'espace de confort personnel.

5.4 Discussion

5.4.1 Les tendances dans les estimations

Les résultats montrent que l'estimation des distances et des volumes est différente selon les questions. Avec l'*estimation des distances*, les distances étaient surestimées, alors qu'avec la *perception des tailles* et l'*habitabilité*, les distances et les volumes étaient sous-estimés. Plusieurs interprétations sont possibles.

Ce résultat est conforme aux travaux précédents qui ont révélé que l'estimation des distances et la précision dépendent de la méthode d'évaluation utilisée, notamment la manière dont les participants expriment la distance perçue [RW07, GNP⁺10]. Dans notre expérimentation, pour l'*estimation des distances*, les participants ont choisi une réponse parmi quatre pour estimer la taille des pièces, tandis que pour la *perception des tailles* et l'*habitabilité*, les participants devaient imaginer les situations. Puis, en se basant sur la distance perçue, ils donnaient une réponse. Cette différence dans la manière d'interpréter la distance perçue a pu générer la différence d'estimation observée entre les méthodes.

De plus, la différence entre les questions, en termes de précision, peut être liée à la stratégie utilisée pour répondre aux questions. La stratégie utilisée par les participants pour estimer les distances et les volumes n'était pas la même entre une quantification (*estimation de distance*) et une projection en EV (*perception des tailles* et *habitabilité*). Nous avons confirmé ceci par le résultat du débriefing. La majorité des participants ont avoué utiliser une stratégie de calcul pour l'*estimation de distance*. Ainsi, ils ont essayé d'imaginer un segment d'un mètre, ou un segment équivalent à leur taille le long des murs, et puis ils ont calculé le nombre d'unités. Contrairement à l'*estimation des distances*, pour la *perception des tailles* et l'*habitabilité*, les participants ont indiqué se projeter dans l'EV et essayer d'imaginer les situations demandées pour donner les réponses.

Dans le cas des maisons meublées, l'ameublement n'a pas une influence significative sur l'*estimation des distances*, contrairement à notre hypothèse. Ceci peut s'expliquer par la stratégie de calcul des participants qui est basée sur la longueur d'un mètre, ou la taille des participants, et non pas sur la taille des meubles présents dans la scène.

Une autre raison possible pour cette différence dans l'estimation peut être le dispositif d'affichage utilisé. Durant le débriefing, plusieurs participants ont signalé l'absence de projection sur le sol. Nous avons utilisé un grand écran sans projection sur le sol, ce qui peut créer un problème de visibilité. Le participant, face à l'écran, ne peut pas voir la partie de la scène qui se trouve entre lui et l'écran. Spécifiquement, pour l'*estimation des distances*, le participant peut tourner pour voir la taille des murs ou des objets pour estimer leur taille. Alors que pour la *perception des tailles* et l'*habitabilité*, le participant se déplace dans les pièces mais n'arrive pas à voir la totalité du volume de la pièce, à cause de l'absence de projection sur le sol, et par conséquent sous-estime les volumes.

Notre résultat de surestimation pour l'*estimation des distances* est conforme avec le travail précédent [Zik07] qui avait utilisé une configuration matérielle similaire. Dans cette étude, les dimensions des pièces dans les maisons, largeur et profondeur, ont été également surestimées avec un affichage sur un grand écran.

Par ailleurs, nous avons observé une relation linéaire positive entre la visualisation spatiale et l'habitabilité. Bien que faible, la capacité des personnes à percevoir les changements dans l'environnement (résultat du test de visualisation spatiale) corrèle bien avec les performances spatiales des sujets notamment la perception de l'habitabilité. Cette relation a été déjà démontrée dans travail de Goerger *et al.* [GDB⁺98]. Les résultats obtenus concluent que les tests de Guilford et Zimmerman [GUI56] corrèlent bien avec des tâches spatiales réalisées en EV comme l'estimation des distances et la navigation. Toutefois, dans notre travail cette corrélation n'a été remarquée que sur la perception de l'habitabilité. Comme nous l'avons déjà expliqué la manière d'estimer les distances influence les performances. En effet, l'estimation des distances dans [GDB⁺98] était effectuée à l'aide de la méthode d'estimation indirecte ce qui est différent de notre méthode. Cette corrélation nécessite davantage d'analyse afin d'identifier les caractéristiques de la visualisation spatiale utilisées pour l'estimation de l'habitabilité.

5.4.2 Profil cognitif

Concernant le profil cognitif, les personnes avec le profil visuel préfèrent les représentations visuelles et les images, pour comprendre et apprendre. Lors du débriefing, les participants ont déclaré avoir utilisé une stratégie de calcul pour l'*estimation des distances*. Calculer les distances, en se basant sur les informations visuelles, a facilité la tâche pour les participants au profil visuel. Ils ont été plus précis que ceux aux profils auditif et kinesthésique, ce qui confirme notre première hypothèse. Par contre, durant les visites virtuelles, les participants avec le profil visuel se sont appuyés sur les informations visuelles présentes dans la scène et, comme les couleurs et les textures dans la scène virtuelle ne sont pas pleinement réalistes, et que les participants avec le profil visuel sont plus sensibles à cette différence entre les environnements réel et virtuel, ils ont trouvé la visite virtuelle plus difficile, et en conséquence, leur sentiment de présence était plus faible que les participants à profils auditif et kinesthésique. En outre, cette incohérence visuelle a induit des symptômes significatifs du mal du simulateur chez les participants à profil visuel et non pas chez les participants à profil auditif.

Les personnes à profil kinesthésique apprennent en se déplaçant et en réalisant des tâches. Dans notre

expérimentation, les résultats ont montré que les participants à profil kinesthésique ont trouvé la tâche de visite virtuelle plus facile que ceux aux profils auditif et visuel. Explorer et naviguer en EV semble les avoir aidés et leur avoir facilité la tâche. De plus, les participants à profil kinesthésique ont obtenu un bon résultat dans la carte cognitive. La navigation semble les avoir aidés à construire une carte cognitive plus précise de l'environnement. Cependant, comme les participants à profil kinesthésique comprennent en bougeant et en réalisant des tâches, l'absence de la marche physique (pour la navigation) ne leur a pas offert un bon sentiment de présence. De même, la navigation passive ne leur a pas fourni assez d'informations pour estimer les distances. Par conséquent, ils étaient moins précis en *estimation des distances*.

Les personnes à profil auditif sont plus sensibles aux informations auditives. Même en l'absence des instructions verbales et de son durant les visites virtuelles, les participants à profil auditif ont eu un bon sentiment de présence comparés aux autres profils, d'autant qu'ils sont plus sensible aux informations auditives que visuelles et tactiles. En d'autres termes, même si les couleurs, les textures et la navigation passive, ne sont pas semblables à la réalité, les participants à profil auditif acceptent cette différence et se projettent facilement en EV. De plus, leur sentiment de présence les a probablement aidés à comprendre l'environnement et à construire une carte cognitive précise de l'EV, comme le montrent les résultats. Par ailleurs, l'insensibilité aux incohérences visuelles semble diminuer les symptômes du mal du simulateur chez les personnes à profil auditif. En effet, les symptômes étaient minimaux.

Nous n'avons pas trouvé dans la littérature de travaux qui ont étudié l'influence du profil cognitif sur la performance en EV, ce qui nous a empêché de faire des comparaisons avec nos résultats. Comme nous l'avions supposé, le profil cognitif a plusieurs impacts sur la performance lors des visites virtuelles. Par conséquent, ce facteur peut être un sujet important pour de futurs travaux.

5.4.3 Vitesse et ameublement des maisons

Le niveau d'immersion a été influencé par la vitesse de navigation. Les participants avec la vitesse dynamique étaient moins présents que les participants avec les vitesses lente et normale. Lors du débriefing, les participants ont indiqué que la transition entre la vitesse normale et lente était un peu brutale. Par conséquent, leur sentiment de présence était le plus faible. Toutefois, dans la mesure où l'*estimation des distances* était moins surestimée avec la vitesse dynamique, des améliorations telles que l'utilisation d'un algorithme d'adaptation de la vitesse à l'environnement, comme celui de [Arg14], pourrait améliorer l'efficacité de la vitesse dynamique lors des visites virtuelles.

Nous avons testé deux types d'environnements pour examiner l'importance de l'ameublement dans les scènes. Comme nous l'avons supposé, les participants dans les maisons meublées ont une meilleure compréhension spatiale que les participants dans les maisons non meublées. Le score de la carte cognitive est meilleur dans la condition meublée. Ce résultat confirme l'hypothèse que l'environnement meublé améliore la compréhension spatiale. La présence de meubles donne une signification aux différentes pièces de la maison (séjour, chambre, etc.) et aide à se rappeler de l'environnement après la visite virtuelle. Néanmoins, les participants dans les maisons meublées sous-estiment plus les volumes et l'habitabilité. Une raison probable pour ce résultat peut être liée à notre dispositif d'affichage qui n'offre pas de projection sur le sol. Spécifiquement, la surface autour des pieds est invisible. Plusieurs participants ont évoqué ce manque de projection lors du débriefing. Il est probable que dans la condition meublée, les participants aient trouvé l'environnement encombré, d'autant qu'ils n'arrivaient pas à voir la totalité du

volume sur l'écran, et par conséquent qu'ils aient considéré que l'espace était plus petit.

Plusieurs travaux précédents ont évoqué l'importance de la visibilité du sol dans l'estimation des distances en environnements réels. Les travaux de [WOH04] ont trouvé une sous-estimation des distances pour les distances entre 4 et 7 m, uniquement lorsque la partie proche du sol, jusqu'à 2.55 m, n'était pas visible. En outre, d'après l'expérience menée dans [SOH98b], une altération de l'évaluation des distances a été trouvée lorsque l'observateur se trouvait sur une texture différente à celle où la cible était placée, de même, lorsqu'un trou séparait l'observateur et la cible.

5.5 Conclusion

Cette étude représente une expérience qui évalue, selon plusieurs critères, les visites virtuelles dans des scènes d'intérieurs de maison. L'objectif était d'identifier et souligner les facteurs qui affectent les visites virtuelles, notamment, l'estimation des distances et des volumes. Nous avons identifié et étudié trois facteurs : la vitesse de navigation, l'ameublement et le profil cognitif (VAK).

Conformément aux études précédentes, nos résultats montrent une différence dans la précision entre les questions métriques (estimation des distances) et les questions qui nécessitent une projection dans l'environnement virtuel (habitabilité). Les distances sont surestimées lorsqu'elles sont estimées avec une unité métrique et sous-estimées lorsque l'on juge de l'habitabilité. En outre, les stratégies utilisées et le profil cognitif ont une influence sur l'estimation des distances et des volumes et semblent avoir un impact important sur les visites virtuelles en général. Par conséquent, le profil cognitif est un facteur important qui nécessite davantage de recherche.

À travers cette étude, nous avons cherché à trouver des réglages appropriés pour notre outil de revue de projet. De nos résultats, nous proposons les recommandations suivantes pour les outils de revue de projet :

- 1) Une vitesse de navigation lente à 0.55 m/s est adaptée aux visites virtuelles en environnement architectural. Cette dernière offre la même performance que la vitesse dynamique et est meilleure que la vitesse normale pour l'estimation des distances. En outre, elle facilite la tâche d'estimation des distances et conduit à une bonne estimation. Elle offre également un bon sentiment de présence.
- 2) Les maisons meublées semblent meilleures pour une bonne compréhension du plan des maisons. En outre, elles offrent une estimation des distances et des tailles similaire à celle en environnement non meublé. Cependant, l'estimation de l'habitabilité (le volume de la pièce) reste à améliorer et nécessite d'être examinée dans de futurs travaux, dans la mesure où elle peut être liée au dispositif d'affichage utilisé.

Expérimentation II : La projection hybride pour élargir le champ de vision géométrique vertical

Sommaire

6.1	Projection hybride pour élargir le champ de vision vertical	134
6.1.1	Problématique et motivations	134
6.1.2	Terminologies	135
6.1.3	Principe de la projection hybride	135
6.1.4	Mise en œuvre de la projection hybride	137
6.1.5	Objectifs	140
6.2	Protocole expérimental	140
6.2.1	La méthode	141
6.2.2	Matériel et stimuli visuels	141
6.2.3	Participants	141
6.2.4	Mesures et évaluation	142
6.2.5	Hypothèses	143
6.2.6	Procédure	143
6.3	Résultats	143
6.3.1	La projection	143
6.3.2	L'ameublement des maisons	147
6.4	Discussion	149
6.4.1	Les tendances dans les estimations	149
6.4.2	La carte cognitive	149
6.4.3	L'ameublement des maisons et l'habitabilité	150
6.4.4	La difficulté de la tâche et la présence	151
6.4.5	Le mal du simulateur	152
6.5	Conclusion	153

La visualisation des scènes virtuelles et la revue de projet peut se faire à l'aide de différents dispositifs d'affichage offrant différents champs de vision allant du plus petit au champ de vision panoramique de 360°. Les dispositifs d'affichage comme les CAVEs procurent une immersion totale aux utilisateurs et un champ de vision large. Cependant, ce type de dispositif reste cher comme solution matérielle pour les revues de projet, notamment lorsqu'un projet nécessite plusieurs salles d'immersion géographiquement distantes. Les HMDs sont des solutions plus économiques, toutefois ces derniers ne permettent pas d'immerger plusieurs utilisateurs en même temps pour la revue de projet.

Les grands écrans ou les télévisions 3D sont des solutions possibles qui répondent aux besoins de la revue de projet tant qu'au niveau d'immersion qu'au niveau économique. Cependant, ils n'offrent pas de projection sur le sol et sont limités au niveau du champ de vision vertical.

C'est pourquoi, dans cette deuxième expérimentation, nous avons proposé l'utilisation d'une projection hybride qui permet d'augmenter le champ de vision géométrique vertical et de limiter les distorsions de la scène virtuelle afin de préserver l'estimation des distances en EV.

Dans la suite, nous détaillerons la technique de projection utilisée et nous présenterons l'expérimentation que nous avons effectuée pour valider la performance de la projection hybride.

6.1 Projection hybride pour élargir le champ de vision vertical

6.1.1 Problématique et motivations

Dans l'expérimentation précédente, nous avons constaté une sous-estimation plus importante de l'habitabilité avec les maisons meublées. Le manque de la projection au sol est une interprétation possible. En effet, dans notre salle de RV, le mur immersif ne permet pas de projection au sol. Par conséquent, lorsque l'utilisateur est debout à une distance de 1.5m face à l'écran et voit la scène virtuelle à la première personne, l'espace qui l'entoure jusqu'à 1.5 mètre n'est ni projeté au sol ni sur l'écran. Seul l'espace et les objets placés à plus de 1.5m de lui sont visible sur l'écran. Ce manque de visibilité a été évoqué par plusieurs participants lors des sessions du débriefing.

Dans le contexte des visites virtuelles, cette absence de projection au sol peut induire un manque dans la perception de l'espace personnel, ce qui peut altérer la perception de l'espace des pièces. Or ceci constitue un élément important dans la compréhension et l'évaluation du plan de la maison. En effet, lorsque l'utilisateur visite de petites pièces comme les toilettes et la salle de bain où la profondeur des pièces ne dépasse pas les 2m, l'utilisateur debout à l'entrée de la pièce ne voit pas la totalité des éléments basiques nécessaires à la compréhension de la fonctionnalité de la pièce comme le siège des toilettes ou le lavabo. Par conséquent, à la fin de la visite il ne se rappelle plus de ces pièces et les oublie dans le plan de la maison.

Par ailleurs, cette absence de projection au sol peut aussi altérer la performance de la navigation en augmentant le nombre et le temps de collisions avec les objets. En effet, lorsque l'utilisateur se déplace dans la pièce en navigation libre, il peut entrer en collision avec des objets qui sont forcément placés devant lui à une distance de moins de 1.5m et donc qui ne sont pas visibles sur l'écran. Dans ce cas, l'utilisateur peut mettre un temps supplémentaire pour d'abord comprendre qu'il est en collision avec un objet et pour ensuite, s'éloigner de l'objet et l'éviter. Puisque nous avons décidé d'utiliser une navigation



FIGURE 6.1: Une vue de la scène que voit le participant se trouvant à l'entrée des toilettes : à gauche avec la projection perspective et à droite avec la projection hybride. La vue sur l'image de droite permet à l'utilisateur de mieux voir le siège des toilettes permettant de créer une image mentale plus précise sur l'environnement.

guidée pour les visites virtuelles de maison, ce deuxième point n'a pas été traité dans l'expérimentation mise en place pour l'évaluation de la solution que nous proposons dans la suite.

Pour résoudre ce problème de visibilité et pour améliorer la perception de l'espace personnel, une solution que nous proposons de tester est d'élargir le champ de vision géométrique vertical afin de permettre la projection de l'espace personnel sur l'écran. Dans le chapitre 2, nous avons présenté des solutions similaires, cependant, elles sont destinées à élargir le champ de vision géométrique horizontal et non pas vertical. De plus, les méthodes de rendu proposées dans des travaux précédents comme la projection cylindrique peuvent induire des déformations importantes dans la scène virtuelle et peuvent ainsi dégrader l'estimation des distances. En conséquence, cette solution n'est pas adaptée à notre contexte de visite virtuelle où l'utilisateur a besoin d'évaluer les dimensions et les volumes des pièces.

Dans ce chapitre, nous proposons une projection hybride qui permet 1) d'élargir le champ de vision géométrique vertical pour atteindre le champ de vision humain de 135° et 2) de minimiser les distorsions sur le rendu final.

6.1.2 Terminologies

- Champ de vision géométrique : l'angle visuel représenté sur la scène virtuelle, produit par la caméra virtuelle [Wal99].
- Champ de vision physique : l'angle visuel calculé en fonction de la taille du dispositif d'affichage et la position des yeux de l'utilisateur [Wal99].

6.1.3 Principe de la projection hybride

La projection hybride que nous proposons se base sur la combinaison de deux types de projections différentes : la projection perspective et la projection cylindrique, le résultat est illustré dans l'image de droite sur la figure 6.1. Cette projection offre un champ de vision géométrique de 135° , ce dernier a été choisi pour reproduire le champ de vision vertical de l'être humain de 135° . Pour le rendu, nous avons divisé l'écran en trois parties : la partie centrale sans déformations pour préserver les distances, et les deux

bords horizontal de l'écran, avec déformations, pour élargir le champ de vision géométrique vertical et notamment améliorer la perception de l'espace personnel sur le bord du bas de l'écran. Le principe est illustré sur la figure 6.2 :

- Le centre de l'écran : dans cette zone, nous avons préservé le champ de vision physique vertical du dispositif d'affichage équivalent à 71° . La scène virtuelle est projetée avec la projection perspective (sans distorsions) et offre un champ de vision géométrique vertical de 71° .
- Les bords de l'écran du haut et du bas : dans ces deux zones la scène virtuelle est projetée avec la projection pseudo-cylindrique où chaque zone permet d'augmenter le champ de vision géométrique de 32° pour obtenir un champ de vision géométrique total de 135° sur tout l'écran.

Dans ce principe de projection, la projection est symétrique sur les axes horizontal et vertical de l'image. Par conséquent, nous avons utilisé le centre de l'écran comme repère pour le calcul des angles de projection que nous détaillons dans la sous section suivante.

Par ailleurs, dans cette expérimentation nous avons utilisé un champ de vision géométrique total de 135° avec 71° pour la projection perspective et 64° pour la projection pseudo-cylindrique. Nous avons choisi ces différents angles pour les raisons citées juste au-dessus. Néanmoins, il est possible de jouer sur ces paramètres selon les objectifs et l'utilisation de la projection.

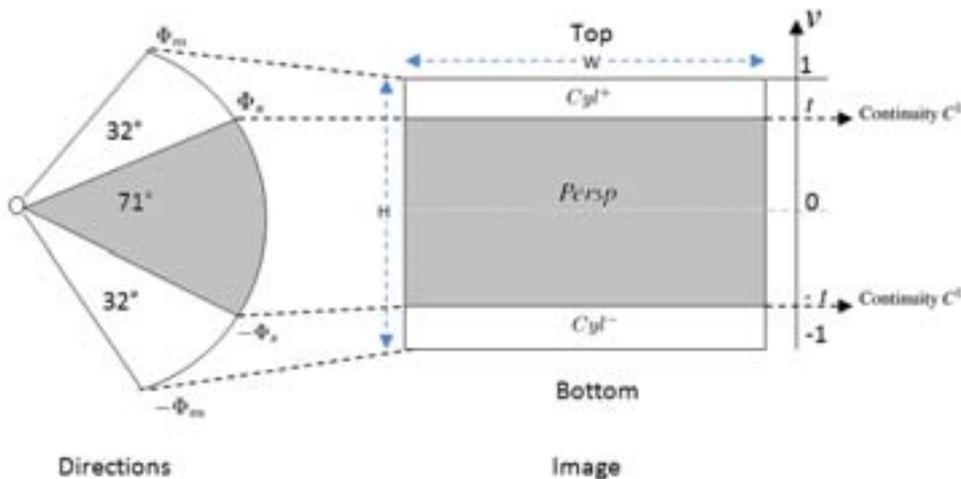


FIGURE 6.2: Le principe de la projection hybride et les différents paramètres de rendu.

Choix des projections

D'autres projections peuvent être combinées pour le rendu, notre choix de combiner la projection perspective avec la projection cylindrique était basé sur la forme de l'écran et les propriétés des projections [ALMM14]. En effet, nous avons choisi d'utiliser la projection perspective car elle permet un rendu sans déformations en conséquence, elle préserve les distances. En outre, nous avons choisi la projection cylindrique pour les bords de l'écran car elle permet de projeter une large partie de la scène sur une petite partie de l'écran en introduisant des déformations uniquement sur les lignes verticales, les lignes horizontales sont préservées en conséquence, les distances aussi. Ces propriétés des deux projections répondent parfaitement à notre objectif de préserver l'estimation des distances, comme avec la projection perspective ordinaire.

D'autres projections peuvent être utilisées à la place de la projection cylindrique, comme la projection d'Hammer [Sny97]. Néanmoins, cette dernière donne une forme elliptique, comme le montre la figure 6.3 et conduit à des déformations des lignes horizontales et verticales. Cette caractéristique de déformer les lignes horizontales peut convenir aux écrans courbés. En effet, les déformations au niveau horizontal peuvent être adaptées à la forme courbée des écrans. Toutefois, nous avons utilisé un grand écran plat d'où la nécessité d'éviter les déformations inutiles pour les lignes horizontales. Les déformations verticales restent obligatoires afin de projeter un champ de vision vertical plus large sur une petite partie de l'écran.

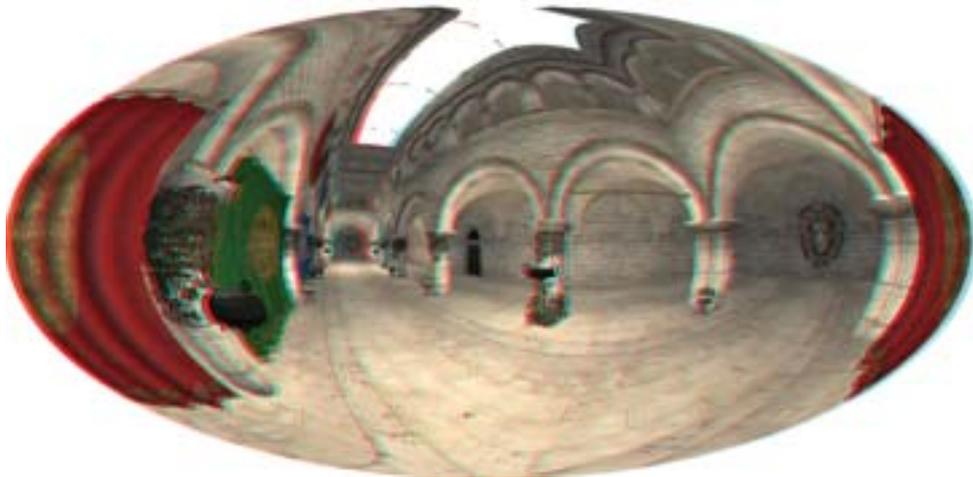


FIGURE 6.3: Rendu d'une scène virtuelle avec un champ de vision horizontal de 360° en utilisant la projection Hammer. Image tirée de [ALMM14]

6.1.4 Mise en œuvre de la projection hybride

La projection hybride permet de visualiser une image formée par deux projections différentes. Le rendu est effectué en deux étapes :

- *Pre-processing* :

Dans cette étape, la scène est projetée sur une *cube-map* centrée autour de la position de l'utilisateur comme un ensemble de 6 textures mappées sur les faces d'un cube virtuel entourant la caméra. Ce *pré-processing* fournit un moyen facile d'accéder à une image de tout l'environnement qui entoure l'utilisateur en permettant de récupérer directement l'apparence de la scène dans n'importe quelle direction d .

- *Rendu de la scène* :

Pour chaque pixel p de l'image finale, la *cube-map* est échantillonnée dans la direction $d(p)$. Chaque pixel est projeté avec le *shader* approprié.

Contraintes et paramètres

Pour obtenir une image cohérente et lisse avec la projection hybride, nous avons imposé deux contraintes :

- Continuité C^1 dans les directions à l'interface entre les projections afin d'éviter une transition brutale formant des angles droits.
- Symétrie par rapport aux axes horizontal et vertical de l'image.

La formation des différentes zones de projection est indiquée à travers plusieurs paramètres, comme le montre les figures 6.2 et 6.4 :

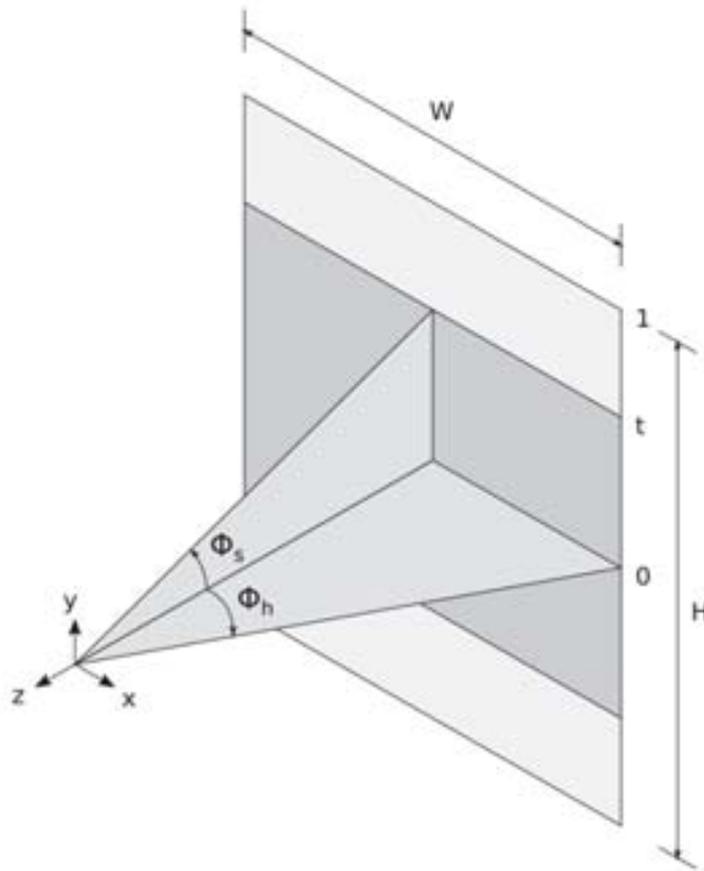


FIGURE 6.4: L'espace des directions utilisé pour le calcul de rendu.

- Φ_h : demi-angle d'ouverture horizontal de la projection perspective.
- Φ_s : demi-angle d'ouverture vertical de la projection perspective.
- Φ_m : demi-angle d'ouverture vertical extérieur (limite) de la projection pseudo-cylindrique.
- t : position verticale de la transition entre les deux projections ($t \in I = [-1, 1]$, I l'espace image normalisé).

Soit $\varphi = W/H$ qui représente le rapport largeur/hauteur de l'image la projection perspective au centre de l'écran doit être isotrope et sans déformation, et les pixels de l'image sont carrés. Pour respecter ces contraintes, les paramètres Φ_h et Φ_s vérifient la relation suivante :

$$\frac{\tan \Phi_h}{\frac{\tan \Phi_s}{t}} = \frac{W/2}{H/2} = \varphi$$

$$t \cdot \tan \Phi_h = \varphi \cdot \tan \Phi_s$$

Paramétrisation de l'espace des directions

Nous avons adopté la paramétrisation de l'espace des directions suivantes à l'aide des angles (θ, Φ) :

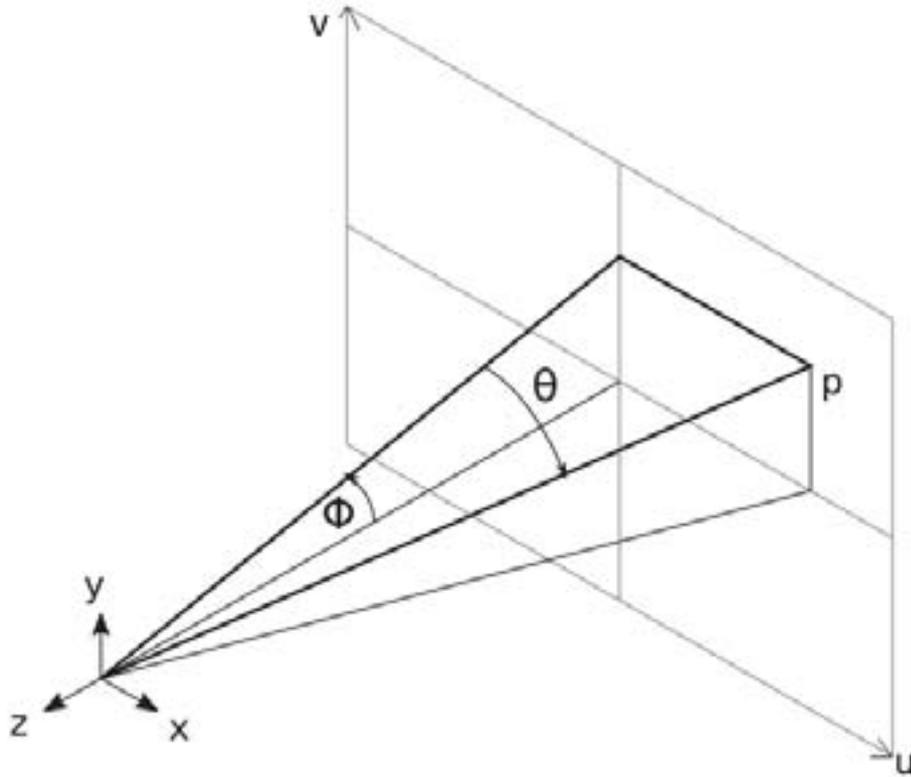


FIGURE 6.5: La paramétrisation de l'espace des directions.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin \Phi \cdot \cos \theta \\ -\cos \Phi \cdot \cos \theta \end{bmatrix}$$

Le plan image est supposé situé à $z = -1$ sans perte de généralité. Ainsi, cette paramétrisation est choisie car une ligne horizontale $y = y_0$ dans l'image $\{p \mid p = (x, y_0, -1), x \in \mathbb{R}\}$ est représentée par un paramètre ϕ_0 constant, ce qui facilite l'expression des contraintes.

Calcul de directions

Pour le rendu final, en partant de la *cube-map* générée :

1. Chaque pixel p représenté par ses coordonnées normalisées dans l'image $p = p(u, v) = (x, y, -1)$ correspond à la direction (θ, Φ) . On cherche à exprimer ce point dans le repère sphérique choisi.
2. Selon la position du pixel sur les trois différentes zones de l'écran, nous utilisons la projection adéquate pour calculer la direction (θ, Φ) . Nous appliquons soit la projection perspective $(\theta_{persp}, \Phi_{persp})(u, v)$ lorsque le pixel est situé dans la zone centrale de l'écran, soit la projection pseudo-cylindrique si le pixel est situé sur la zone du haut $(\theta_{cyl+}, \Phi_{cyl+})(u, v)$ ou du bas $(\theta_{cyl-}, \Phi_{cyl-})(u, v)$ de l'écran.

$$(\theta, \Phi)(u, v) = \begin{cases} (\theta_{cyl-}, \Phi_{cyl-})(u, v) & \text{si } v \leq -t \\ (\theta_{persp}, \Phi_{persp})(u, v) & \text{si } -t < v < t \\ (\theta_{cyl+}, \Phi_{cyl+})(u, v) & \text{si } v \geq t \end{cases} \quad (6.1)$$

On pose $(\theta, \Phi)(u, v)$ la paire de fonctions exprimant ces directions en fonctions des coordonnées normalisées (u, v) d'un point dans l'image. Le calcul de direction (θ, Φ) correspond à l'équation 6.2 pour la projection perspective et l'équation 6.3 pour la projection pseudo-cylindrique.

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{persp}(u, v) = \arctan\left(\frac{u \tan \Phi_h}{\sqrt{1 + \left(\frac{v}{t} \tan \Phi_s\right)^2}}\right) \\ \Phi_{persp}(u, v) = \arctan\left(\frac{v}{t} \tan \Phi_s\right) \end{array} \right. \quad (6.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{cyl+,-}(u, v) = \theta_{persp}(u, t) \\ \Phi_{cyl+}(u, v) = \frac{v-t}{1-t}(\Phi_m - \Phi_s) + \Phi_s \\ \Phi_{cyl-}(u, v) = -\frac{v+t}{-1+t}(\Phi_m - \Phi_s) - \Phi_s \end{array} \right. \quad (6.3)$$

3. Afin d'éviter une transition brutale entre deux zones de projections différentes, nous avons modifié la projection cylindrique afin d'obtenir les mêmes valeurs et les mêmes gradients selon v à l'interface avec la projection perspective.

Les pixels se situant dans la zone de transition entre les deux projections ($v = t$ ou $v = -t$) doivent répondre à la contrainte de continuité imposée. Le calcul de direction doit vérifier la contrainte 6.4 pour la partie haute de l'écran et 6.5 pour la partie du bas de l'écran.

$$La\ part\ haute = \left\{ \begin{array}{ll} \Phi_{persp}(u, t) = \Phi_{cyl+}(u, t) = \Phi_s & \text{Continuité } C^0 \\ \frac{\partial \Phi_{persp}}{\partial v}(u, t) = \frac{\partial \Phi_{cyl+}}{\partial v}(u, t) & \text{Continuité } C^1 \end{array} \right. \quad (6.4)$$

$$La\ part\ basse = \left\{ \begin{array}{ll} \Phi_{persp}(u, -t) = \Phi_{cyl-}(u, -t) = -\Phi_s & \text{Continuité } C^0 \\ \frac{\partial \Phi_{persp}}{\partial v}(u, -t) = \frac{\partial \Phi_{cyl-}}{\partial v}(u, -t) & \text{Continuité } C^1 \end{array} \right. \quad (6.5)$$

La continuité est ainsi imposée entre deux zones de projection perspective et cylindrique.

6.1.5 Objectifs

L'objectif de l'utilisation de la projection hybride est :

- D'élargir le champ de vision géométrique vertical afin d'améliorer la perception de l'espace personnel,
- limiter les déformations aux bords de l'écran afin de préserver l'estimation des distances et des volumes,
- proposer une approche applicable à d'autres dispositifs d'affichage similaires (sans projection au sol) comme les télévisions 3D.

6.2 Protocole expérimental

Afin d'évaluer l'efficacité de la projection hybride relativement à l'estimation des distances et des volumes et la perception de l'espace personnel, nous avons mis en place un protocole expérimental

semblable à celui de l'expérimentation I. Nous avons deux variables indépendantes, le type de projection et l'ameublement. Nous avons comparé l'estimation des distances et de l'espace personnel avec la projection hybride et avec la projection perspective classique. En outre, nous avons examiné deux conditions d'ameublement, l'expérimentation s'étant déroulée soit des maisons meublées soit des maisons non meublées.

6.2.1 La méthode

Dans cette étude expérimentale, les participants effectuent des visites virtuelles de maison et évaluent les dimensions et l'habitabilité afin de vérifier si la projection hybride préserve l'estimation de ces dernières. En outre, pour évaluer la perception de l'espace personnel, les participants esquissent le plan de la maison visitée pour évaluer la carte mentale acquise lors de la visite virtuelle. Par ailleurs, nous avons utilisé des maisons meublées et des maisons non meublées pour examiner l'influence de la présence d'objets dans la scène sur la projection hybride. La visite virtuelle suit un chemin prédéfini comme dans l'expérimentation I. Concernant la vitesse de navigation, nous avons suivi les recommandations proposées dans l'expérimentation I et nous l'avons fixée à une vitesse lente de 0.55 m/s. Les quatre conditions expérimentales sont :

- Maisons meublées + projection hybride ;
- maisons non meublées + projection hybride ;
- maisons meublées + projection perspective ;
- maisons non meublées + projection perspective.

6.2.2 Matériel et stimuli visuels

Durant cette expérience, nous avons utilisé la salle de RV *In Virtuo* présentée dans l'expérimentation I (même dispositif d'affichage et périphérique d'interaction). La hauteur des yeux des sujets et de la caméra virtuelle étaient réglées à 112 cm ce qui correspond au centre de l'écran et à l'origine du calcul des angles pour les différentes projections. Cette hauteur des yeux, selon les résultats de Riecke *et al.* [RBS09] conduit à des estimations des distances précises. Le sujet s'assoit sur une chaise réglable en hauteur pour régler la hauteur de ses yeux à une distance de 1.5 m de l'écran.

L'utilisation de la stéréoscopie nécessite de doubler les calculs tenant compte des deux yeux. Par ailleurs, pour intégrer le suivi de la tête dans la projection hybride, nous devons recalculer les différents angles de projection en fonction de la position de la tête - utilisée comme origine dans le repère de calcul. Par conséquent, de légères modifications dans la position de la tête conduit à des calculs importants. Pour ces raisons, nous avons utilisé une vision non-stéréoscopique sans suivi du mouvement.

Pour les stimuli visuels nous avons utilisé les mêmes scènes virtuelles que pour l'expérimentation I soit, 4 maisons meublées et 4 maisons non meublées.

6.2.3 Participants

Quarante sujets ont participé à cette expérimentation. Ils étaient âgés entre 19 et 48 ans avec une moyenne d'âge de 24 ans. Les participants sont des étudiants, des ingénieurs ou des enseignants en informatique de notre université, ils étaient tous volontaires. Tous ont une vision normale ou corrigée. La

majorité des participants ont effectué au préalable une expérience dans notre salle de RV. Les participants sont distribués de manière équitable sur les 4 conditions, 10 sujets par groupe.

6.2.4 Mesures et évaluation

Questionnaire de compréhension spatiale

Nous avons utilisé le questionnaire de compréhension spatiale de l'expérimentation I (présenté dans le chapitre 4, section 4.3.1) pour évaluer l'estimation des distances et des volumes (CS1) et la compréhension du plan de la maison à l'aide de la carte cognitive (CS2).

Dans l'analyse des résultats, que ce soit pour l'estimation des distances ou pour la perception des tailles et de l'habitabilité, nous avons calculé l'écart entre la bonne réponse et la réponse donnée, si l'écart est nul l'estimation est précise, si l'écart est positif la distance est surestimée, sinon elle est sous-estimée. Concernant l'estimation des distances, un écart de 1 à la bonne valeur représente 15 %, puisque les valeurs des différentes propositions ont été calculées avec une sous/surestimation de 15 % par rapport à la bonne valeur. Concernant, la perception des tailles et l'habitabilité l'écart trouvé indique uniquement la précision, car la signification d'un écart dans une échelle varie selon la question. C'est à dire plus l'écart est grand (positif ou négatif) plus la sous/surestimation est importante.

Par ailleurs, la carte cognitive (CS2) est évaluée avec une note subjective sur 5 où 5 est la meilleure note. En effet, le plan redessiné de la maison et le chemin de la visite ont été évalués selon cinq éléments qui sont 1) la forme des pièces, 2) leur agencement, 3) les proportions, 4) la taille des pièces et l'ordre de la visite, en attribuant un point par élément.

Présence (QP)

Nous avons mesuré le niveau de présence avec le questionnaire standard (PQ) de Witmer et Singer [WS98] traduit en français par le Laboratoire de Cyberpsychologie de l'Université du Québec en Outaouais (UQO) [dQeOU02b]. Ce questionnaire nous permet d'évaluer le niveau de présence sur une échelle de 7, avec 7 représentant un bon sentiment de présence. L'objectif est, principalement, d'examiner l'influence du type de projection sur le niveau de présence.

Mal du simulateur (SSQ)

Nous avons évalué le mal du simulateur avec le questionnaire standard (SSQ) de Kennedy et ses collègues [KLBL93] traduit en français par le Laboratoire de Cyberpsychologie de l'Université du Québec en Outaouais (UQO) [dQeOU02a] pour examiner l'influence de la projection sur le mal du simulateur. Le questionnaire regroupe trois symptômes : 1) la nausée, 2) fatigue oculaire et 3) la désorientation. Chaque question est évaluée avec un poids pour chaque symptôme. La moyenne pondérée de ces trois facteurs définit le score total (le niveau du mal du simulateur). Ce score correspond à plusieurs degrés comme le montre le tableau 5.2.

De manière similaire à l'expérimentation I, nous avons évalué les symptômes après la première visite (SSQ1) et après la dernière visite (SSQ2). Dans l'analyse statistique, nous avons analysé l'état des participants à la fin des visites soit le SSQ2. Par ailleurs, nous avons analysé l'évolution des symptômes au cours des visites en analysant l'écart entre SSQ1 et SSQ2 soit $SSQ2 - SSQ1$, afin d'examiner l'influence de la projection sur l'augmentation du mal du simulateur au cours des visites virtuelles.

6.2.5 Hypothèses

Notre objectif est d'évaluer l'estimation des distances et de l'espace personnel. Nous émettons les hypothèses suivantes sur les résultats :

H1 Nous estimons que l'estimation des distances et des volumes est similaire entre les deux types de projections, car la projection hybride limite les déformations aux bords de l'écran.

H2 Nous prévoyons que la compréhension spatiale (CS2) évaluée par la carte cognitive s'améliore avec la projection hybride grâce à l'amélioration de la perception de l'espace personnel, notamment la perception des petites pièces comme la salle de bain et les toilettes.

6.2.6 Procédure

Dans chaque condition, il est demandé aux participants d'effectuer une série de visites virtuelles de quatre maisons différentes. La durée des quatre visites virtuelles est d'environ 35 minutes et la durée totale de l'expérience est d'environ 50 minutes incluant les visites et les questionnaires. Aucune pause n'est effectuée au cours de l'expérience, cette dernière se déroule sur trois phases comme l'expérimentation I (chapitre 5). En revanche, dans cette expérience, le sujet ne répond pas aux questionnaires de VAK [CC05] ni à ceux de l'orientation et visualisation spatiale [GUI56]. Puisque nous n'avons pas utilisé le système de suivi des périphériques, les sujets ont utilisé les flèches de la *wiimote* au lieu de sa propre orientation pour tourner la caméra virtuelle à gauche et à droite.

6.3 Résultats

Le plan d'expérience utilisé dans cette étude est un plan inter-groupe. Pour l'analyse statistique, d'abord nous avons vérifié que nos données remplissaient les conditions de normalité et d'homogénéité des données, en utilisant les tests de Shapiro-Wilk et de Bartlett. Lorsque les conditions sont respectées, une ANOVA multi-factorielle a été opérée sur les données récoltées pendant cette expérience. Nos variables indépendantes sont le type de projection et d'ameublement et les variables dépendantes sont l'estimation des distances, la perception des tailles, l'habitabilité et la difficulté de la tâche. En outre, nous avons analysé l'effet de la projection et de l'ameublement sur la carte cognitive (CS2), la présence (PQ), le SSQ2, et l'augmentation du SSQ. Lorsque l'ANOVA multi-factorielle révèle un impact significatif ($p < 0.05$) d'une variable indépendante, nous effectuons une analyse post-hoc par le test de Tukey HSD, afin d'identifier les différences significatives.

6.3.1 La projection

Nous présentons tous les résultats concernant la projection dans le tableau 6.1.

Les tendances dans les estimations

Nous regroupons ici les résultats de l'estimation des distances, la perception des tailles et l'habitabilité. Concernant l'estimation des distances, les valeurs reportées dans le tableau 6.1 représente la moyenne des écarts à la bonne valeur. En l'occurrence un écart de 1 représente 15% de sous/surestimations car les différents choix proposés au sujet ont été calculés avec une sous/surestimation de 15 % par rapport à la bonne valeur.

Projection	Estimation des distances	Perception des tailles	Habitabilité	Difficulté de la tâche	CS2	QP	SSQ2	Augmentation SSQ
Hybride	0.484	-1.039	-0.693	4.222	3.934	4.633	11.952	3.414
Perspective	0.360	-0.121	-0.157	4.369	3.692	4.419	7.043	3.054
$F(1,38)$	0.026	0.023	0.002	1.584	9.103	3.554	4.324	3.554
p -value	0.874	0.881	0.967	0.225	0.007	0.07	0.039	0.659

TABLE 6.1: Valeur moyenne, valeurs de F et p -value qui montrent l'influence du type de projection sur les variables dépendantes et sur CS2, QP, SSQ2 et l'augmentation du SSQ. Les valeurs en gras représentent les résultats significatifs.

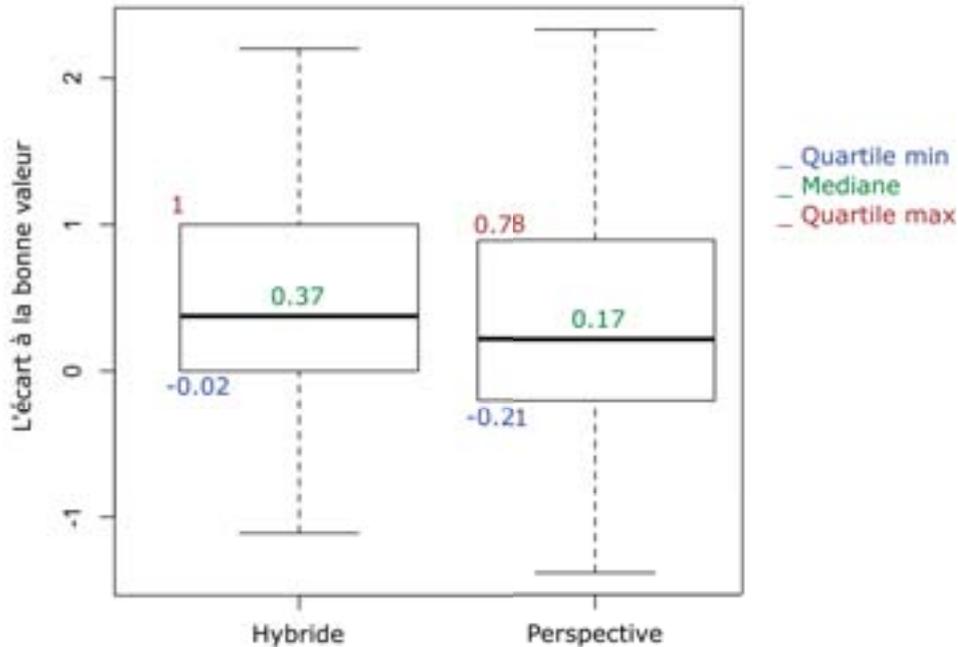


FIGURE 6.6: Boite à moustache représentant la distribution de l'estimation des distances en fonction du type de projection.

Concernant la perception des tailles et l'habitabilité, elles étaient évaluées sur une échelle de 1 à 7. Comme pour l'estimation des distances, les valeurs reportées dans le tableau 6.1 représentent la moyenne des écarts à la bonne réponse. Cependant, en l'occurrence l'écart ne représente pas un pourcentage spécifique car, la signification de l'écart de l'échelle dépend de la question elle-même. Par conséquent, la seule information que nous pouvons tirer des résultats est l'amplitude de la sous/surestimation. Nous pouvons dire que pour un écart (positif ou négatif) très grand de 0 que la sous/surestimation est plus ou moins importante.

Comme l'indiquent les données se trouvant dans le tableau 6.1, pour chaque mesure de distance soit l'estimation des distances, la perception des tailles et l'habitabilité, le type de projection n'a pas d'influence significative avec ($F(1,38) = 0.026$, p -value = 0.874), ($F(1,38) = 0.023$, p -value = 0.881) et ($F(1,38) = 0.002$, p -value = 0.967) respectivement. Il semblerait donc que la projection hybride préserve la perception des distances et des volumes. Ce résultat valide notre hypothèse **H1**.

Concernant les tendances dans les estimations, le constat est identique à l'expérimentation I, comme le montre la figure 6.6, les dimensions des murs (estimation des distances) sont surestimées avec quasiment

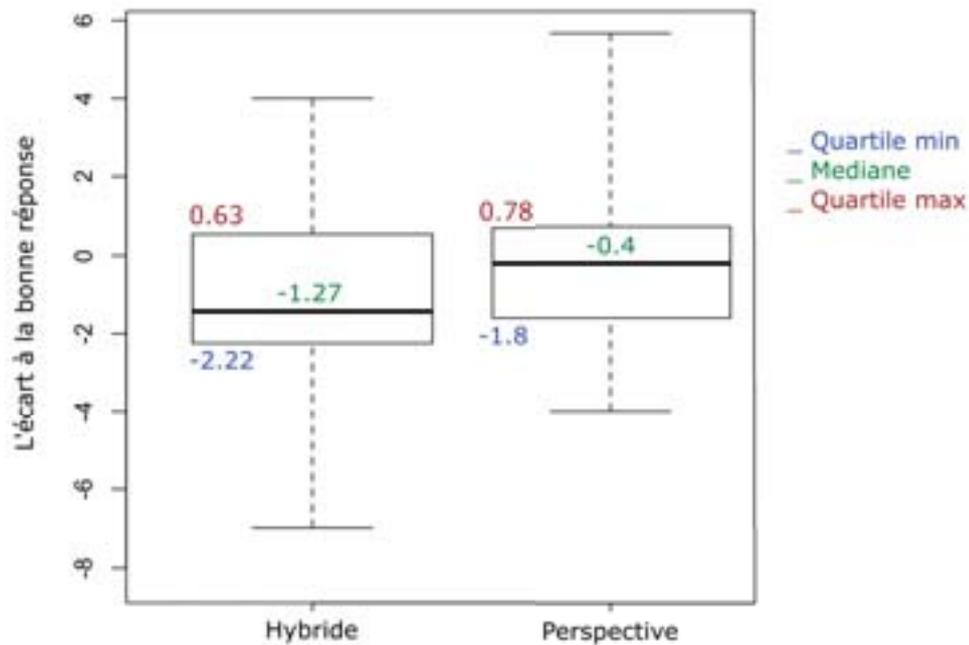


FIGURE 6.7: Boite à moustache représentant la distribution de la perception des taille en fonction du type de projection.

50% des valeurs entre 0 et 1. Puisque pour certaines questions la bonne réponse peut être la valeur de la première ou de la quatrième proposition, l'écart de la sous/surestimation peut aller jusqu'à -3 ou +3. En conséquence, nous constatons une légère surestimation.

Par ailleurs, puisque les valeurs des différentes propositions ont été calculées avec une sous/surestimation de 15 % par rapport à la bonne valeur, ce résultat montre que la surestimation est, en général, de l'ordre de 15% (écart entre les valeurs 0 et 1), du fait de la construction du questionnaire

En revanche, la perception des tailles et de l'habitabilité sont sous-estimées. Comme le montre la figure 6.7, dans la perception des tailles, 50% des valeurs moyennes sont quasiment entre 0 et -2 ce qui signifie une légère sous-estimation de la perception des tailles. De même, concernant l'habitabilité la figure 6.8 montre que 50% des valeurs moyennes sont quasiment entre 1 et -2 avec une moyenne globale inférieur à zéro confirmant la sous-estimation de l'habitabilité.

La carte cognitive (CS2)

La carte cognitive a été évaluée avec une note subjective de 5 où 5 représente une carte cognitive précise. Cette dernière a été évaluée selon 5 critères (un point par critère), la taille, la forme et l'agencement des pièces, les proportions et l'ordre de la visite.

Le type de projection a une influence significative sur la précision de la carte cognitive ($F(1,38) = 9.103, p\text{-value} = 0.007$). Les participants avec la projection hybride ont un meilleur score avec une moyenne de 3.934/5 que les participants avec la projection perspective (3.692/5), comme le montre le tableau 6.1. La projection hybride permet donc de mieux comprendre le plan de la maison. Ce résultat valide notre hypothèse **H2**.

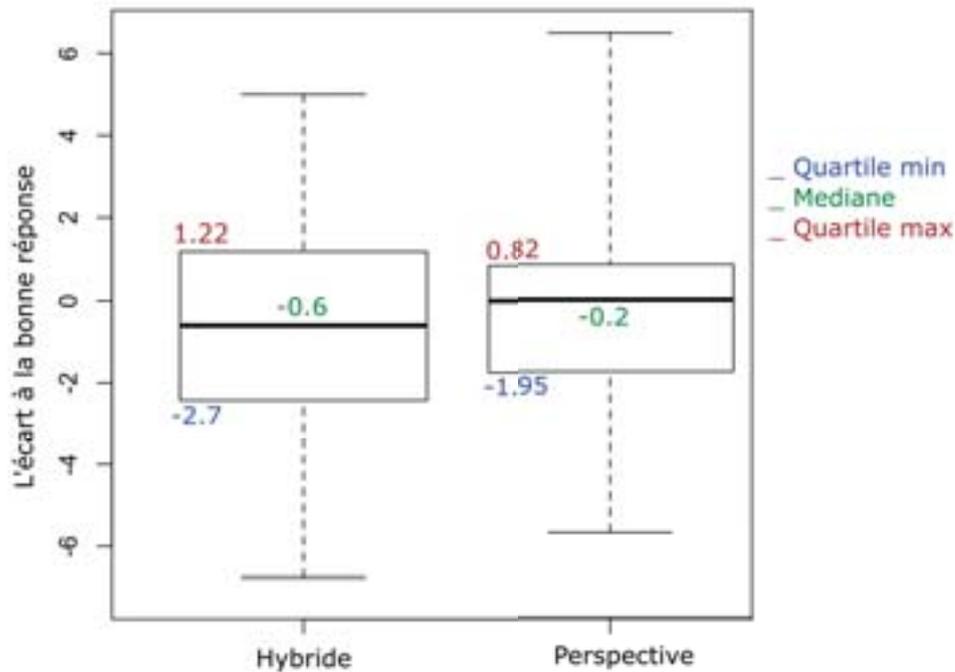


FIGURE 6.8: Boite à moustache représentant la distribution de l'habitabilité en fonction du type de projection.

Difficulté de la tâche

La difficulté de la tâche est une évaluation sur une échelle de Likert de 1 à 7 (7 étant le plus difficile). Le type de projection n'a aucune influence significative sur la difficulté de la tâche ($F(1,38) = 1.584$, $p\text{-value} = 0.225$), voir le tableau 6.1. Dans l'ensemble, la visite virtuelle avec l'estimation des distances est relativement difficile avec une note moyenne de 4.222 et 4.369 pour la projection hybride et perspective respectivement.

La présence (QP)

Le niveau de présence est une évaluation sur une échelle de Likert de 1 à 7 où 7 est le niveau élevé. L'analyse statistique révèle une tendance du type de projection sur la présence ($F(1,38) = 3.554$, $p\text{-value} = 0.076$), voir le tableau 6.1. Les participants avec la projection hybride ont tendance à se sentir plus présents dans la scène virtuelle que les participants avec la projection perspective avec une moyenne de 4.633/7 et de 4.419/7, respectivement.

Le mal du simulateur (SSQ)

Nous avons évalué le mal du simulateur avec un score qui représente la moyenne pondérée des scores des trois facteurs : la nausée, la fatigue oculaire et la désorientation. Ce score correspond à plusieurs degrés comme le montre le tableau 5.2, présenté dans le chapitre précédent, section 5.2.4.

L'analyse statistique révèle que la projection a un impact significatif ($F(1,38) = 4.324$, $p\text{-value} = 0.039$) sur le mal du simulateur final SSQ2, voir le tableau 6.1. L'analyse post-hoc indique qu'à la fin des quatre visites virtuelles, les participants ayant eu la projection hybride ont des symptômes plus importants que les participants ayant eu la projection perspective. En effet, le score SSQ2 est de 11.952 dans la projection

hybride ce qui signifie que les participants avaient des symptômes significatifs (selon la table 5.2) tandis que dans la projection perspective, le score SSQ2 est de 7.043, signifiant des symptômes minimaux.

Toutefois, aucun impact significatif sur l'augmentation du SSQ n'a été constaté pour la projection ($F(1,38) = 3.554$, $p\text{-value} = 0.659$). L'augmentation des symptômes au cours des visites semble similaire dans les deux projections.

6.3.2 L'ameublement des maisons

Le tableau 6.2 résume le résultat de l'influence de l'ameublement des maisons sur les variables dépendantes.

Condition d'ameublement	Estimation des distances	Perception des tailles	Habitabilité	Difficulté de la tâche	CS2	QP	SSQ2	Augmentation SSQ
Meublée	0.351	0.925	-0.529	4.065	4.345	4.567	6.482	1.871
Non meublée	0.444	-0.445	-0.503	4.5	3.270	4.479	12.513	4.598
$F(1,38)$	0.037	0.030	0.030	2.127	18.982	8.218	2.153	8.218
$p\text{-value}$	0.850	0.865	0.863	0.163	<0.001	0.010	0.002	0.003

TABLE 6.2: Valeur moyenne, valeurs de F et $p\text{-value}$ qui montrent l'influence de l'ameublement sur les variables dépendantes et sur CS2, QP, SSQ2 et l'augmentation du SSQ. Les valeurs en gras représentent les résultats significatifs.

Les tendances dans les estimations

Nous regroupons ici les résultats de l'estimation des distances, la perception des tailles et l'habitabilité.

Aucun impact significatif sur l'estimation des distances, la perception des tailles et l'habitabilité n'a été constaté pour l'ameublement avec ($F(1,38) = 0.037$, $p\text{-value} = 0.850$), ($F(1,38) = 0.030$, $p\text{-value} = 0.865$) et ($F(1,38) = 0.030$, $p\text{-value} = 0.863$), respectivement, voir le tableau 6.2.

En revanche, nous avons constaté une interaction significative entre l'ameublement et le type de projection ($p\text{-value} = 0.045$) sur l'habitabilité, comme le montre la figure 6.9. Cette interaction suggère d'examiner l'influence des variables indépendantes séparément. Par conséquent, nous avons séparé les données selon chaque type de projection et nous avons réalisé une ANOVA examinant l'influence de l'ameublement sur l'estimation de l'habitabilité, avec un niveau de signification de 0.025 pour considérer l'ANOVA multiple. Cette analyse révèle une influence significative de l'ameublement sur l'habitabilité avec la projection perspective ($p\text{-value} = 0.014$). Cependant, aucun impact significatif n'est présent avec la projection hybride ($p\text{-value} = 0.556$). Concernant la projection perspective, l'habitabilité est surestimée dans les maisons non meublées avec une moyenne de 0.991 et sous estimée dans les maisons meublées avec une moyenne de -1.456, comme le montre le tableau 6.3. Cette différence n'est pas remarquée avec la projection hybride où l'habitabilité est sous estimée dans les deux types de maisons avec des moyennes de -0.416 et -0.827 dans les maisons meublées et non meublées, respectivement. Cependant l'estimation est plus précise avec la projection hybride, comme le montre la figure 6.9.

Projection	Maison meublée	Maison non meublée
Hybride	-0.416	-0.827
Perspective	-1.456	0.991

TABLE 6.3: Les valeurs moyennes de l'habitabilité en fonction de la projection et l'ameublement.

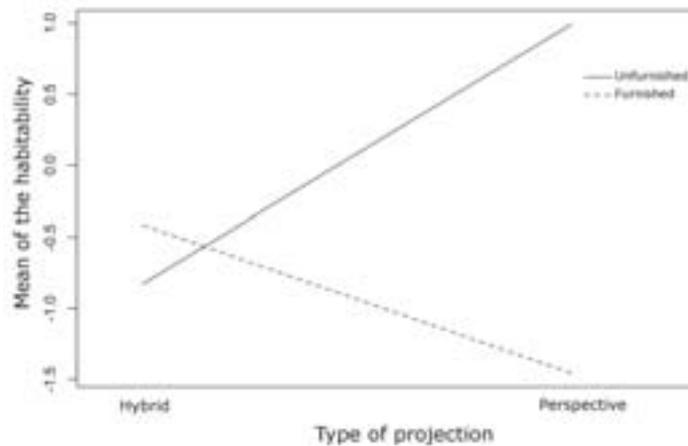


FIGURE 6.9: Interaction entre l'ameublement et le type de projection sur l'habitabilité.

La carte cognitive (CS2)

L'analyse statistique montre un impact significatif de l'ameublement sur la précision de la carte cognitive ($F(1,38) = 18.982$, $p\text{-value} < 0.001$), voir le tableau 6.2. Comme nous l'avons constaté dans l'expérimentation I, la présence de meubles dans les maisons virtuelles semble aider les participants dans la compréhension du plan de la maison. En effet, dans les maisons meublées les participants ont réussi à créer une carte cognitive plus précise, ils ont obtenu un score moyen de 4.345/5. Tandis que, dans les maisons non meublées les participants étaient moins bons, leur score moyen était de 3.27/5.

La difficulté de la tâche

Aucun impact significatif de l'ameublement sur la difficulté de la tâche n'a été révélé par l'analyse statistique ($F(1,38) = 2.127$, $p\text{-value} = 0.163$), voir le tableau 6.2. La présence de meubles dans les maisons ne semble pas faciliter la tâche d'estimation des distances et de l'habitabilité.

La présence

La différence du niveau de présence entre les maisons meublées et non meublées semble faible mais est néanmoins significative ($F(1,38) = 8.218$, $p\text{-value} = 0.01$), voir le tableau 6.2. Le niveau de présence est plus élevé dans les maisons meublées (4,567/7) que dans les maisons non meublées (4,479/7). Il semblerait que la présence de meubles dans les maisons incite davantage les participants à ce concentrer sur la visite virtuelle et à se projeter dans l'EV.

Le mal du simulateur

L'analyse statistique montre une influence significative de l'ameublement sur le SSQ2 ($F(1,38) = 2.153$, $p\text{-value} < 0.05$), voir le tableau 6.2. L'analyse post-opératoire de comparaison de l'ameublement révèle que dans les maisons non meublées, les symptômes du mal du simulateur à la fin des visites virtuelles sont significativement plus importants avec un score du SSQ2 de 12.513, signifiant des symptômes significatifs, selon le tableau 5.2 de l'interprétation des symptômes. Ce score représente presque le double du score dans les maisons meublées. Dans ces dernières, le score du SSQ2 est de 6.482, signifiant des symptômes minimaux.

De même, l'ameublement semble avoir un impact significatif ($F(1,38) = 8.218$, $p\text{-value} < 0.05$) sur l'augmentation du mal du simulateur au cours des visites virtuelles. La comparaison paire-à-paire révèle une augmentation des symptômes plus importante dans les maisons non meublées que dans les maisons meublées. En effet, la différence des scores soit SSQ2-SSQ1 est de 1.870 dans les maisons meublées tandis qu'elle est de 4.598 dans les maisons non meublées, voir le tableau 6.2.

6.4 Discussion

6.4.1 Les tendances dans les estimations

Le phénomène de surestimation des dimensions des murs et de sous-estimation dans la perception des tailles et de l'habitabilité est cohérent avec les résultats de l'expérimentation I et a été déjà discuté dans le chapitre 5.

Au vu des résultats obtenus, il semblerait que la projection hybride préserve l'estimation des distances et de l'habitabilité. Même si l'écart dans les valeurs moyennes semble un peu élevé, la différence reste non significative. Par conséquent, ce résultat confirme bien notre hypothèse de départ **H1**, et valide bien la performance de la projection hybride pour l'estimation des distances. La technique de rendu hybride permet donc d'élargir le champ de vision géométrique vertical tout en préservant l'estimation des distances et des volumes. Avec cette technique de rendu, les distances sont préservées sur une large partie centrale de l'écran, ce qui a conduit à une performance similaire entre les deux types de projection. En effet lors du débriefing, la plupart des participants ont indiqué s'appuyer sur la partie centrale de l'écran pour répondre aux questions.

6.4.2 La carte cognitive

Les résultats indiquent que les participants ayant eu la projection hybride ont un meilleur score pour la réalisation de la carte cognitive comparativement aux participants ayant eu la projection perspective. Ceci signifie que les participants ayant eu la projection hybride arrivent à mieux comprendre le plan de la maison que les participants ayant eu la projection perspective. Ainsi à la fin de la visite virtuelle, ils arrivent à créer une carte cognitive plus précise que les autres participants.

Nous attribuons cette différence à la perception de l'espace personnel qui est problématique avec la projection perspective. En effet, avec la projection perspective le champ de vision vertical est de 71° , ainsi dans les petits espaces comme les toilettes ou la salle de bain où la profondeur des pièces peut être proche de 2m, les participants debout à l'entrée de la pièce ne pouvaient pas voir ou voyaient juste une partie des éléments de base présents dans la pièce comme le siège des toilettes ou le lavabo, comme illustré dans

la figure 6.1. Par conséquent, ils n'arrivaient pas à bien comprendre la fonction de ces petites pièces et ils étaient incapables de mémoriser l'agencement des pièces (quelle pièce était à côté de l'autre) pour restituer le plan de la maison à la fin de la visite virtuelle. En conséquence, ils étaient incapables de créer une carte cognitive précise de l'environnement visité.

Durant la session de débriefing certains participants ont indiqué avoir visité ces petites pièces dont ils étaient incapables de se rappeler la signification. D'autres participants ont reporté avoir oublié la position des toilettes ou de la salle de bain dans la maison et avoir même un doute s'il y en avait dans la maison.

En revanche, avec la projection hybride lorsque les participants visitent ces pièces, ils pouvaient voir les éléments de base présents dans les pièces (siège des toilettes, lavabo, etc.) comme le montre l'image de droite sur la figure 6.1. Par conséquent, ils avaient une image complète de la pièce et de son rôle ainsi, à la fin de la visite virtuelle, ils ont réussi à créer une carte cognitive plus précise. Ce résultat confirme notre hypothèse **H2** que la projection hybride améliore la perception de l'espace personnel et conduit à mieux comprendre le plan de la maison.

Par ailleurs, les résultats montrent que la visite dans les maisons meublées conduit à créer une carte cognitive plus précise que dans les maisons non meublées. Ce résultat est conforme au résultat trouvé dans l'expérimentation I. La présence de meubles dans les maisons semble aider les participants à mieux comprendre le plan de la maison et le rôle de chaque pièce (séjour, chambre, etc.) et leur permet de mieux se rappeler de la maison après la visite virtuelle. Cependant, dans les maisons non meublées, même si les questions lors de la visite donnent des indications sur la fonctionnalité finale de chaque pièce, ces indications ne semblent pas les aider dans la création de la carte cognitive (exemple du type de questions : *Si vous deviez aménager la chambre comme une chambre parentale avec un grand lit double et deux tables de chevets, que vous placez sur le mur de la fenêtre, vous pensez que l'espace serait : 1) insuffisant, 2), 3), 4), 5), 6), 7) très suffisant*).

6.4.3 L'ameublement des maisons et l'habitabilité

Bien que l'ameublement et la projection n'ont pas d'influence significative sur l'estimation de l'habitabilité, nous avons trouvé une interaction significative entre les deux variables indépendantes (ameublement et projection) sur l'estimation de l'habitabilité. Cette interaction a révélé un impact significatif de la condition d'ameublement sur l'estimation de l'habitabilité uniquement avec la projection perspective lorsque nous avons considéré chaque type de projection à part.

Avec la projection perspective, l'habitabilité était surestimée dans les maisons non meublées et sous-estimée dans les maisons meublées. Toutefois, aucune différence significative dans l'estimation de l'habitabilité n'est révélée entre les deux types de maison avec la projection hybride, les participants ayant estimé l'habitabilité avec la même performance dans les deux types de maison.

Une raison possible de cette différence peut être la perception de l'échelle. Pour évaluer l'habitabilité - *e.g. Imaginez que vous passez une soirée debout dans cette pièce avec dix autres personnes. Estimez-vous que l'espace disponible vous permettrait de vous sentir : 1) pas à l'aise, 2), 3), 4), 5), 6), 7) très à l'aise* - les participants lors du débriefing ont indiqué qu'ils essayaient d'imaginer des personnes dans la pièce et d'évaluer si l'espace permettait d'accueillir le nombre de personnes indiqué ou non. Probablement que, dans les maisons meublées, avec les deux projections, les participants sous estiment l'espace libre entre les meubles et par conséquent sous estiment le nombre de personnes possible dans la pièce et l'habitabilité.

Sur la figure 6.9, nous remarquons que l'habitabilité est plus précise avec la projection hybride mais cette différence reste non significative.

Dans les maisons non meublées, les participants ont utilisé la même stratégie pour évaluer l'habitabilité. Toutefois, ils devaient aussi imaginer les meubles. Par conséquent, probablement qu'ils ont imaginé les meubles avec une échelle approximative (des meubles de taille plus petite) et ainsi surestimé le nombre possible de personnes dans la pièce et donc l'habitabilité ceci pour la projection perspective. En revanche, dans la projection hybride, les participants ont probablement mal perçu l'échelle des parties déformées. En conséquence, lorsqu'ils ont évalué l'habitabilité sur ces parties de l'écran ils ont sous estimé l'espace, ce qui a conduit à une sous estimation de l'habitabilité. Il est important de souligner que cette différence dans l'estimation de l'habitabilité n'est pas significative entre les deux projections ce qui laisse notre hypothèse de départ **H1** valide.

Cette interprétation liée à l'échelle peut être confirmée par le résultat de l'habitabilité dans la projection hybride où la performance est similaire dans les deux types de maison. En effet, la présence de meubles dans les maisons meublées permet aux participants de percevoir l'échelle sur les parties déformées et ainsi d'évaluer l'habitabilité avec la même performance que les participants ayant eu la projection perspective. Toutefois, l'absence de meubles dans les maisons non meublées empêche les participants de bien percevoir l'échelle sur les parties déformées et conduit à une sous estimation de l'habitabilité, alors qu'elle est surestimée dans la projection perspective. Ce problème de perception de l'échelle était déjà évoqué dans des travaux précédent suggérant que la présence d'indices d'échelle peut améliorer l'estimation des distances [LK03].

Nous relevons de ce résultat que dans la projection hybride la présence de meuble dans la scène virtuelle améliore la perception de l'échelle sur les parties déformées et aide à mieux percevoir les distances et les volumes. Par conséquent, avec la projection hybride, nous recommandons l'utilisation des maisons meublées dans le contexte des visites virtuelles. Cette recommandation reste conforme aux recommandations de l'expérimentation I.

6.4.4 La difficulté de la tâche et la présence

La projection hybride est jugée comme adaptée aux visites virtuelles. Ceci est confirmé par le résultat de l'évaluation de la difficulté de la tâche où les participants ont reporté un niveau de difficulté similaire avec les deux types de projection. Par conséquent, les déformations aux bords de l'écran ne semblent pas déranger la visite virtuelle et l'estimation des distances et des volumes.

Par ailleurs, la projection hybride semble offrir un bon niveau de présence. Les résultats ont révélé que les participants ayant eu la projection hybride ont une tendance à se sentir plus présent que les autres participants. Ceci peut-être lié aux déformations sur les bords de l'écran car de nombreux participants ont indiqué que lors de la navigation, les déformations sur les bords de l'écran les ont incités à se concentrer sur l'écran et la visite virtuelle. Par conséquent, ils avaient tendance à se sentir plus présent en EV. D'un autre côté, ce résultat peut-être lié au champ de vision plus large. En effet, ce résultat est conforme au résultat trouvé dans [SKHR02]. Dans ce travail, les participants ont effectué une expérimentation de conduite passive avec plusieurs champs de vision horizontaux. Les résultats ont montré une augmentation du niveau de présence en fonction de l'augmentation du champ de vision.

Le résultat de l'influence de l'ameublement sur la difficulté de la tâche ne montre aucune différence significative entre les deux types de maison. Néanmoins, le sentiment de présence était significativement

meilleur dans les maisons meublées. Ce résultat nous semble logique car visiter des maisons meublées incite davantage les personnes à se projeter dans l'environnement ce qui se traduit par un niveau de présence plus élevé. Cependant, cette influence n'a pas été remarquée dans l'expérimentation 1, le sentiment de présence étant similaire dans les deux types de maison. Cette comparaison reste à valider plus complètement car plusieurs facteurs ont changé entre les deux expérimentations. En effet, la vision est monoscopique sans suivi de la tête et la hauteur des yeux était fixée à 112 cm.

6.4.5 Le mal du simulateur

Bien que la projection hybride incite à se projeter dans la scène virtuelle, elle semble provoquer un mal du simulateur plus important. À la fin des visites virtuelles, les participants ayant eu la projection hybride ont obtenu des symptômes plus élevés que les participants ayant eu la projection perspective. Ce résultat est probablement lié aux déformations de la scène aux bords de l'écran. Ces déformations sont particulièrement remarquables et gênantes lors du déplacement dans la scène. Pendant le débriefing, certains participants ont indiqué que le fait de voir les objets bouger sur les parties déformées lors de la navigation était dérangent notamment au début de l'expérimentation. Toutefois, ce résultat n'est pas forcément induit par ces déformations et peut être provoqué par le champ de vision large offert par la projection. En effet, des résultats similaires ont été remarqués dans [SKHR02]. Ce travail a examiné l'influence de l'augmentation du champ de vision horizontal sur le mal du simulateur, la projection était sans déformation en utilisant la projection perspective. Les résultats ont révélé une augmentation des symptômes en fonction du champ de vision, plus le champ de vision est large, plus les symptômes augmentent.

Par ailleurs, il est à noter que même si la projection hybride provoque davantage de symptômes, ces derniers restent raisonnables. Selon le tableau de l'interprétation des scores du SSQ (voir la table 5.2), le score du SSQ2 obtenu avec la projection hybride représente des symptômes significatifs mais pas sévères. Par ailleurs, l'augmentation des symptômes aux cours des visites est similaire avec les deux projections, aucune différence significative n'a été remarquée.

Concernant l'influence de l'ameublement sur le mal du simulateur, les visites virtuelles dans les maisons non meublées ont provoqué davantage de symptômes que les visites dans les maisons meublées. À la fin des visites virtuelles, le score du SSQ2 était significativement plus élevé dans les maisons non meublées que dans les maisons meublées. Comme pour la projection, selon le tableau de la classification des symptômes 5.2, le score SSQ2 reste raisonnable et dans la catégorie des symptômes significatifs. Cette influence du stimulus visuel sur le SSQ est similaire aux résultats trouvés dans [MRC⁺]. Ce travail a examiné l'influence de la scène virtuelle sur les symptômes du mal du simulateur, les scores du SSQ étaient différents selon la scène virtuelle utilisée.

En outre, l'augmentation des symptômes au cours des visites semble significativement différente entre les deux types de maison. Les symptômes augmentent davantage dans les maisons non meublées. Par conséquent, la navigation dans des pièces vides ne semble pas très adaptée aux visites virtuelles. Visiblement la présence des meubles dans la scène virtuelle stabilise les symptômes du mal du simulateur. Cependant, cette interprétation n'est valide que pour cette expérimentation, puisque dans l'expérimentation 1 ce comportement n'a pas été remarqué. Dans cette précédente étude, la vision était stéréoscopique avec un suivi de la position de la tête et une hauteur des yeux adaptée à chaque participant.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une technique de projection hybride permettant d'élargir le champ de vision géométrique vertical à 135° afin d'améliorer la perception de l'espace personnel. Nos motivations de départ pour concevoir cette projection étaient d'améliorer la perception de l'espace personnel avec un champ de vision vertical plus large et de limiter les déformations du rendu afin de préserver l'estimation des distances et des volumes, importante pour les visites virtuelles. Le principe de cette projection consiste à combiner deux types de projection différentes : la projection perspective pour le rendu de la partie centrale de l'écran et la projection cylindrique pour le rendu des bords de l'écran.

Nous avons conçu un protocole expérimental permettant de vérifier l'efficacité de la projection hybride, notamment pour vérifier si elle préserve l'estimation des distances et des volumes. La tâche demandée aux participants de cette expérience était d'évaluer les distances et les volumes lors de visites virtuelles et d'exprimer la compréhension du plan de la maison en le dessinant après la visite. Nous avons mené l'expérience dans des maisons meublées et non meublées pour comparer la perception de l'espace personnel, les distances et l'habitabilité entre la projection hybride et perspective. Les résultats ont révélé que la projection hybride fournit la même performance dans l'estimation des distances et des volumes que la projection perspective. En outre, elle améliore la perception de l'espace personnel en améliorant la perception de petites chambres (les toilettes, salle de bain) et en conduisant ainsi à une meilleure compréhension du plan de la maison. Par contre, les symptômes du mal du simulateur étaient plus importants avec la projection hybride. Toutefois, cet effet n'est pas forcément lié aux déformations de la scène mais selon des travaux précédents, ceci est plutôt dû au champ de vision large.

Les résultats ont montré que la technique de projection influence l'estimation de l'habitabilité en fonction de la condition d'ameublement. La projection hybride a permis de percevoir l'habitabilité avec la même performance et avec plus de précision dans les deux types de maison, ce qui n'était pas le cas avec la projection perspective. Ce résultat résout parfaitement le problème de l'estimation de l'habitabilité remarqué dans l'expérimentation précédente.

Dans le contexte de ce travail, nous avons suggéré d'utiliser la projection hybride avec des maisons meublées qui contiennent des objets fournissant des informations sur l'échelle afin de mieux comprendre l'échelle des parties déformées et mieux juger les distances.

Comme nous l'avons indiqué, la projection hybride offre une vision monoscopique sans suivi de mouvement de la tête. Dans des futures travaux, nous suggérons d'introduire la vision stéréoscopique avec le changement de perspective fournit par le suivi de la tête.

Expérimentation III : L'influence de la stéréoscopie et du suivi de la tête sur l'estimation des distances lors des visites virtuelles de maison

Sommaire

7.1	Introduction	156
7.2	Protocole expérimental	157
7.2.1	Méthode	157
7.2.2	Matériel et stimuli	158
7.2.3	Participants	158
7.2.4	Mesures et évaluation	158
7.2.5	Hypothèses	158
7.2.6	Procédure	158
7.3	Résultats	159
7.3.1	Les tendances dans les estimations	159
7.3.2	Stéréoscopie et suivi de la tête	160
7.4	Discussion	162
7.4.1	Estimation des distances	162
7.4.2	Habitabilité	163
7.4.3	Les tendances dans les estimations	164
7.4.4	Difficulté de la tâche	164
7.4.5	La carte cognitive	164
7.4.6	La présence	165
7.4.7	Mal du simulateur	165
7.5	Conclusion	166

Dans le chapitre précédent nous avons proposé une projection hybride permettant d'élargir le champ de vision géométrique vertical et d'améliorer la perception de l'espace personnel. Comme nous l'avons

mentionné, la projection hybride, telle qu'elle a été présentée, n'est pas adaptée à la vision stéréoscopique ni au suivi des mouvements de la tête. Pour ce faire, le principe de la projection hybride nécessite d'une part, de doubler les calculs de projection en calculant une projection par œil afin de fournir une vision stéréoscopique et d'autre part, de mettre à jour les angles de projection selon la position de la tête fournie par le système du suivi de la tête. Néanmoins, ces additions peuvent provoquer un temps de latence. Par conséquent, avant d'introduire des améliorations sur la projection hybride et d'optimiser le temps de calcul, nous souhaitons connaître l'importance de la vision stéréoscopique et du suivi de la tête dans l'estimation des distances et des volumes.

Dans ce chapitre, nous voulons examiner les bénéfices réels qu'apportent la stéréoscopie et le suivi de la tête à l'outil de revue de projet, aussi bien au niveau de l'estimation des distances qu'au niveau du confort d'utilisation (mal du simulateur et présence). Nous menons une étude expérimentale permettant d'examiner l'influence de chaque facteur sur les visites virtuelles.

7.1 Introduction

La vision stéréoscopique est un élément majeur dans les systèmes de RV. C'est en reproduisant le fonctionnement naturel de la vision humaine que les systèmes de RV présentent deux images légèrement différentes pour chaque œil en se basant sur la distance entre les deux yeux. Dans le système visuel chaque œil voit l'environnement de sa position, les deux images sur chaque œil étant légèrement différentes. Cette différence dans l'image de l'œil de gauche et dans l'image de l'œil de droite représente la disparité binoculaire qui est considérée comme un indice de profondeur important [PC03]. Elle permet à l'utilisateur de fusionner ces deux images et d'utiliser la différence comme indice de profondeur [RG82].

Toutefois, la stéréoscopie n'est pas toujours parfaite et peut conduire à quelques conflits visuels. Par exemple, la disparité binoculaire dépend de chaque personne, la distance entre les deux yeux varie entre les êtres humains dans un intervalle de 50 à 70mm [Dod04]. Néanmoins, dans les systèmes de RV, généralement la distance interoculaire est fixée à une moyenne standard de 63mm [Dod04] et son adaptation à chaque utilisateur n'est pas toujours évidente. Par exemple, dans notre projet, les architectes ont préféré fixer cette distance, car mesurer et mettre à jour la distance interoculaire pour chaque client introduit un temps supplémentaire à chaque visite. En conséquence, la différence entre la distance interoculaire de l'utilisateur et celle fixée dans le système de RV peut créer une incohérence au niveau de la vision et influencer l'estimation des distances. Par ailleurs, la vision stéréoscopique peut induire un inconfort visuel et provoquer une fatigue au niveau des yeux. Ces derniers sont considérés parmi les symptômes du mal du simulateur tel qu'il est évalué dans [KLBL93].

Dans le chapitre 2, nous avons présenté quelques travaux traitant de l'influence de la stéréoscopie sur l'estimation des distances en EV. Les résultats étaient différents d'une étude à l'autre et n'ont pas permis de tirer une conclusion finale. Partant de ces considérations, nous proposons de mettre en œuvre une étude expérimentale pour examiner l'influence de la stéréoscopie, autant sur l'estimation des distances et des volumes, que sur le mal du simulateur.

En plus de la stéréoscopie, les systèmes de RV fournissent des interactions visuelles comme les rotations au sein des scènes virtuelles ou le suivi de la tête. Ce dernier permet aux utilisateurs de changer le point de vue par des mouvements de tête ou en bougeant le corps. Ce changement se voit dans la scène virtuelle à travers de légers mouvements des objets lointains et des mouvements plus importants sur les objets proches [RKSB13]. Une telle différence dans l'amplitude des mouvements peut aider l'utilisateur à

distinguer les objets lointains des objets proches [KFR07]. Le suivi de la tête peut aussi aider à juger la distance entre les objets [RG79].

Par conséquent, la combinaison de la stéréoscopie et du suivi de la tête fournissent plusieurs informations sur les distances et peut aider à son estimation. Domini *et al.* [DCT06] ont même indiqué que la combinaison des deux facteurs est intrinsèquement interdépendante dans le système visuel. Néanmoins, contrairement aux CAVEs et aux HMDs, les grands écrans ne permettent pas des mouvements importants du corps pour éviter la déconcentration de l'utilisateur puisqu'il n'est pas totalement entouré par la scène virtuelle. En l'occurrence, le suivi de la tête peut être sans intérêt particulier.

Dans cette expérimentation, nous contrôlons la stéréoscopie et le suivi de la tête pour examiner leur influence sur l'estimation des distances et des volumes et sur les visites virtuelles en général.

7.2 Protocole expérimental

L'objectif de la présente expérimentation est d'étudier l'influence de la vision stéréoscopique et du suivi de la tête sur l'estimation des distances et des volumes dans le cadre des visites virtuelles des maisons. Dans l'expérience mise en place, nous avons donc deux facteurs : la vision stéréoscopique et le suivi de la tête. Nous varions le réglage de ces deux facteurs et nous comparons l'influence des trois conditions suivantes sur l'estimation des distances et des volumes lors des visites virtuelles :

1. Vision stéréoscopique + suivi de la tête (**Avec Stéréoscopie Avec Tête (ASAT)**).
2. Vision monoscopique + suivi de la tête (**Sans Stéréoscopie Avec Tête (SSAT)**).
3. Vision monoscopique + sans suivi de la tête (**Sans Stéréoscopie Sans Tête (SSST)**).

Nous n'avons pas examiné la condition vision stéréoscopique + sans suivi de la tête car, il nous semble que ces trois conditions couvrent tous les cas possibles en nous permettant d'étudier les deux facteurs de manière séparée et aussi de manière combinée. En effet, pour étudier l'influence de la stéréoscopie nous fixons le deuxième facteur et nous comparons ASAT - SSAT. De même, nous fixons la stéréoscopie pour examiner l'influence du suivi de la tête en comparant SSAT - SSST. Pour confirmer l'influence de ces deux facteurs nous étudions la différence entre ASAT - SSST.

7.2.1 Méthode

Dans cette expérimentation, les participants effectuent des visites virtuelles de maisons en suivant un chemin prédéfini comme dans l'expérimentation I et II et ils évaluent les distances et les volumes. Les variables indépendantes sont : la vision stéréoscopique et le suivi de la tête.

Dans cette étude, nous avons utilisé les recommandations proposées à l'issue de l'expérimentation I. Ainsi, nous avons fixé la vitesse de navigation à une vitesse lente de 0.55m/s et nous avons effectué les visites virtuelles uniquement à l'intérieur des maisons meublées.

Puisque dans l'expérimentation I nous avons utilisé une vision stéréoscopique combinée avec le suivi de la tête, la première condition de cette troisième expérimentation n'est autre que la condition *vitesse lente + maisons meublées* de l'expérimentation I. Par conséquent, nous ne refaisons pas cette condition. Dans l'analyse statistique, nous reprenons les résultats de cette condition de l'expérimentation I.

7.2.2 Matériel et stimuli

L'expérimentation s'est déroulée dans la plateforme *In Virtuo*, nous avons utilisé le mur immersif comme dispositif d'affichage et la Nintendo Wiimote comme périphérique d'interaction. Pour la condition avec la vision monoscopique, nous avons désactivé la vision stéréoscopique dans le fichier de configuration de l'EV. Le suivi de la tête était activé/désactivé en fonction de la condition. La hauteur des yeux était adaptée à chaque utilisateur dans toutes les conditions expérimentales et la distance interoculaire était fixée à la moyenne standard de 63 mm [Dod04] pour tous les participants.

Notre programme a été développé en C++ et est basé sur la librairie VRJuggler pour la gestion des périphériques.

Nous avons utilisé les mêmes maisons meublées utilisées dans les deux expérimentations précédentes (voir le chapitre 5, sous-section 5.2.2). Les visites virtuelles ont été effectuées à l'échelle réelle.

7.2.3 Participants

Vingt sujets volontaires ont participé à cette étude, âgés entre 19 et 30 ans avec une moyenne de 21 ans. Tous ont une vision normale ou corrigée. Ces derniers n'ont aucune expérience précédente dans des EVs. Les vingt sujets ont été divisés en deux groupes de dix participants, un groupe effectue la condition 2) et l'autre effectue la condition 3).

7.2.4 Mesures et évaluation

Nous avons évalué l'influence de la vision stéréoscopique et du suivi de la tête sur l'estimation des distances et des volumes et sur les visites virtuelles en général en utilisant les mêmes mesures que dans l'expérimentation I (voir chapitre 5, sous section 5.2.4), à l'exception du questionnaire de *l'orientation et la visualisation spatiale* et la mesure de *l'espace de confort*.

7.2.5 Hypothèses

La vision stéréoscopique et le suivi de la tête sont deux indices visuels naturels. La vision stéréoscopique semble fournir des informations sur la profondeur et les distances. Toutefois, elle peut provoquer le mal du simulateur. Par ailleurs, le suivi de la tête aide aussi à l'estimation des distances. Dans cette expérimentation, nous formulons les hypothèses suivantes :

H1 Nous prévoyons que la vision stéréoscopique en combinaison avec le suivi de la tête donne les meilleurs résultats dans l'estimation des distances et des volumes, les deux facteurs ensemble fournissant plusieurs informations sur les distances.

H2 Nous prévoyons que la vision stéréoscopique augmente le mal du simulateur. En effet, la vision stéréoscopique peut provoquer une fatigue des yeux qui est considérée comme un élément important dans l'évaluation du mal du simulateur.

7.2.6 Procédure

Dans cette expérimentation, le sujet visite quatre maisons meublées différentes en suivant un chemin prédéfini. Ces visites durent environ 40 minutes. La durée totale de l'expérience est d'environ 1h10 incluant tous les questionnaires et le débriefing. Les visites virtuelles se déroulent exactement telles qu'elles sont présentées dans l'expérimentation I (voir chapitre 5, sous-section 5.2.6).

Dans le cadre de ce protocole, nous avons utilisé un plan expérimental inter-groupe. Chaque sujet effectue quatre visites virtuelles dans l'une des deux conditions 2) et 3). Dans la condition 3), une fois la scène virtuelle affichée, avant de commencer la visite virtuelle, l'expérimentateur demande au sujet de porter les lunettes 3D, de regarder bien droit l'écran et de s'arrêter de bouger pour calibrer la hauteur des yeux. Une fois ceci fait, il désactive le suivi de la tête et demande au sujet de commencer la visite. Dans les trois conditions les participants portent les lunettes 3D, puisque ces dernières réduisent la vision périphérique, ceci dans le but d'harmoniser les conditions expérimentales avec le premier protocole.

7.3 Résultats

Le plan d'expérience utilisé dans cette étude est un plan inter-groupe. Pour analyser l'ensemble des résultats, nous avons d'abord réalisé les tests de Shapiro-Walik et de Bartlett pour vérifier que nos données remplissaient bien les conditions de normalité et d'homogénéité des données. Dans le cas où les conditions sont respectées, une ANOVA multi-factorielle a été réalisée sur l'ensemble des données mesurées lors de cette expérience. Les variables dépendantes sont l'estimation des distances, la perception des tailles, l'habitabilité et la difficulté de la tâche. La vision stéréoscopique et le suivi de la tête sont les variables indépendantes. En outre, nous avons analysé l'effet de ces deux dernières sur la carte cognitive (CS2), la présence (PQ), le mal du simulateur à la fin des visites (SSQ2), et l'augmentation du SSQ.

Lorsque l'ANOVA multi-factorielle révèle un effet significatif ($p < 0.05$) d'une variable indépendante, nous effectuons une analyse post-hoc par le test de Tukey HSD, afin d'identifier les différences significatives.

Dans un premier temps nous parlerons des tendances dans l'estimation des distances, la perception des tailles et l'habitabilité. Puis, nous présentons les différentes données et valeurs moyennes en fonction des trois conditions expérimentales.

7.3.1 Les tendances dans les estimations

Dans cette sous section nous parlons des tendances dans l'*estimation des distances*, la *perception des tailles* et l'*habitabilité*.

Les valeurs rapportées dans 7.1 représentent l'écart à la bonne réponse que ce soit pour l'*estimation des distances* ou la *perception des tailles* et l'*habitabilité*. Concernant l'estimation des distances un écart de 1 représente une sous/surestimation de 15 % car les différents choix proposés au sujet ont été calculés avec un écart de 15 % à la bonne dimension. Toutefois, l'écart dans la perception des tailles et de l'habitabilité indique uniquement l'amplitude de la sous/surestimation. Plus l'écart (positif ou négatif) s'éloigne de 0 plus la sous/surestimation est importante. Ces deux catégories de question étant évaluées sur une échelle de Likert allant de 1 à 7, la bonne réponse parfois pourrait se trouver à la position 7 ou la position 1 de l'échelle et donc la sous/surestimation peut aller de -6 à 6.

En plus des valeurs rapportées dans le tableau 7.1, la figure 7.1 montre que, comme dans les expérimentations I et II, les dimensions des murs dans les questions *estimation des distances* sont surestimées. Nous remarquons que les valeurs sont distribuées au dessus de zéro, avec quasiment 50% des valeurs entre 0 et 1. Cet écart de 1 représente donc une surestimation moyenne d'environ 15 %, du fait de la construction du questionnaire.

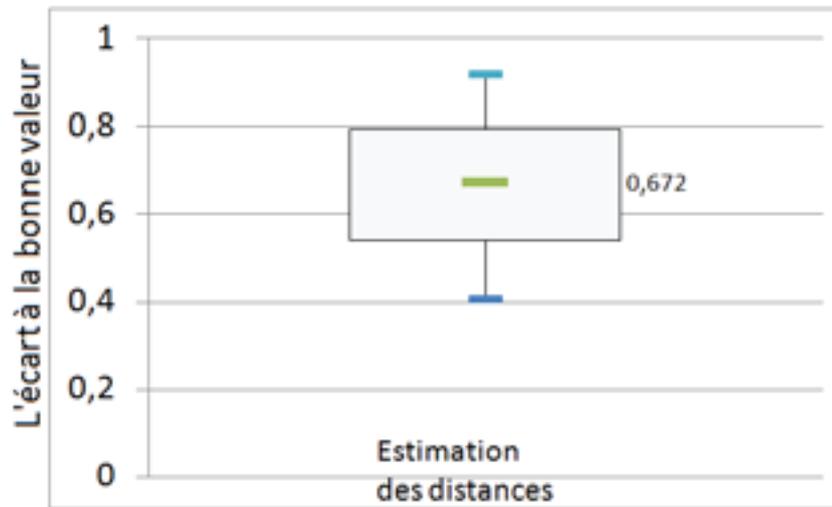


FIGURE 7.1: Distribution des écarts moyens de l'estimation des distances dans les trois conditions.

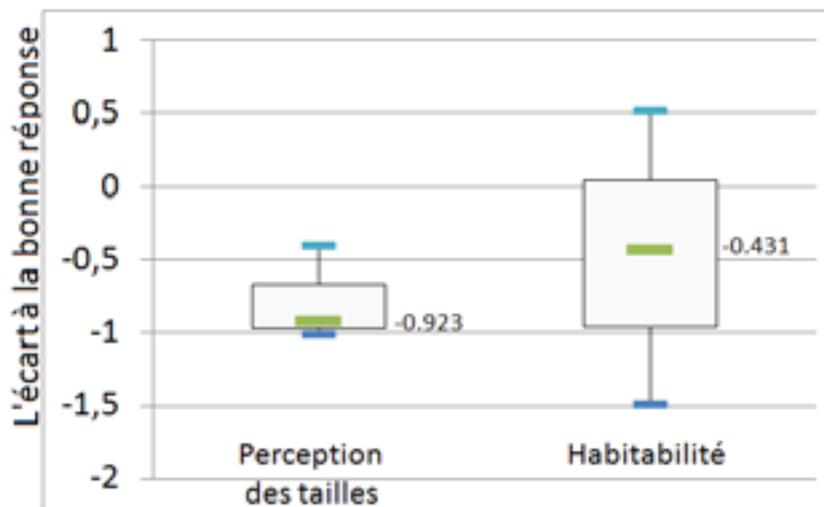


FIGURE 7.2: Distribution des écarts moyens de la perception des tailles et de l'habitabilité dans les trois conditions.

Au contraire, les valeurs présentées et les distributions des valeurs moyennes sur la figure 7.2 montrent que la perception des tailles et l'habitabilité sont globalement sous-estimées. En effet, que ce soit pour la *perception des tailles* ou l'*habitabilité*, quasiment 50% des valeurs moyennes dans toutes les conditions expérimentales sont distribuées au dessous de 0, allant jusqu'à -1.5 pour l'habitabilité. Ce résultat indique une sous-estimation plutôt légère. Nous remarquons aussi que la perception des tailles est plus précise que l'habitabilité.

7.3.2 Stéréoscopie et suivi de la tête

Nous présentons tous les résultats concernant la vision stéréoscopique et le suivi de la tête dans le tableau 7.1. Nos trois conditions sont **ASAT** (avec stéréoscopie, avec suivi de la tête), **SSAT** (sans stéréoscopie, avec suivi de la tête), **SSST** (sans stéréoscopie, sans suivi de la tête).

Condition	Estimation des distances	Perception des tailles	Habitabilité	Difficulté de la tâche	CS2	QP	SSQ2	Augmentation SSQ
ASAT	0.407	-0.923	-1.496	4.050	4.181	4.243	11.178	4.114
SSAT	0.919	-0.404	0.522	4.068	4.278	4.244	6.913	3.740
SSST	0.672	-1.011	-0.431	4.300	4.068	4.290	7.854	2.826
<i>F(2,27)</i>	7.996	0.781	12.853	0.906	0.300	1.279	7.310	0.868
<i>p-value</i>	0.018	0.468	<0.05	0.635	0.860	0.527	0.025	0.647

TABLE 7.1: Valeur moyenne, valeurs de F et p -value qui montrent l'influence de la stéréoscopie et le suivi de la tête sur les variables dépendantes et sur CS2, QP, SSQ2 et l'augmentation du SSQ. Les valeurs en gras représentent les résultats significatifs.

Estimation des distances

L'analyse statistique révèle que les différentes combinaisons de la vision stéréoscopique et le suivi de la tête ont une influence significative sur l'estimation des distances ($F(2,27) = 7.996$, p -value = 0.018). Les comparaisons paire-à-paire indiquent une différence significative uniquement entre ASAT et SSAT avec une valeur de p -value = 0.013. Selon le tableau 7.1, les distances sont plus surestimées avec la vision monoscopique qu'avec la vision stéréoscopique lorsque le suivi de la tête est utilisé, avec une moyenne de 0.919 et de 0.407, respectivement. Aucune différence significative n'a été observée entre ASAT - SSST et SSAT - SSST.

Perception des tailles

Aucun impact significatif sur la perception des tailles n'a été constaté pour les trois combinaisons de la vision stéréoscopique et le suivi de la tête ($F(2,27) = 0.781$, p -value = 0.468). La vision stéréoscopique et le suivi de la tête ne semblent pas influencer la perception des tailles en EV.

Habitabilité

En revanche, nous avons constaté une influence significative des différentes combinaisons de la vision stéréoscopique et le suivi de la tête sur l'habitabilité ($F(2,27) = 12.853$, p -value < 0.05). Comme pour l'estimation des distances, les comparaisons paire-à-paire n'ont révélé une différence significative qu'entre ASAT et SSAT (p -value < 0.05). Selon le tableau 7.1, les participants dans la condition ASAT sous estiment davantage l'habitabilité (-1.496) tandis que les participants dans la condition SSAT surestiment légèrement l'habitabilité (0.522). La différence entre ASAT - SSST et SSAT - SSST n'est pas significative.

Difficulté de la tâche

La différence observée entre les combinaisons de la vision stéréoscopique et le suivi de la tête dans l'évaluation de la difficulté de la tâche n'est pas significative ($F(2,27) = 0.906$, p -value = 0.635). Ce résultat semble indiquer que la vision mono/stéréoscopique et la présence ou non du suivi de la tête offrent le même niveau de difficulté pour les visites virtuelles avec l'estimation des distances. Cette difficulté a été jugée sur une échelle de Likert de 7 (7 étant difficile) comme moyennement difficile avec des moyennes de 4.050, 4.068, 4.3 pour ASAT, SSAT, SSST respectivement, comme le résume le tableau 7.1.

Carte cognitive (CS2) et présence (QP)

De même, aucun impact significatif sur la carte cognitive n'a été constaté pour les trois combinaisons de la vision stéréoscopique et le suivi de la tête ($F(2,27) = 0.300$, $p\text{-value} = 0.860$). Les participants ont obtenu des notes assez bonnes, comme le montre le tableau 7.1, avec des moyennes de 4.181, 4.278 et 4.068 (5 est la meilleure note) pour SAAT, SSAT, SSST respectivement.

Concernant la présence, nous avons le même résultat qu'avec la carte cognitive, indiquant que les trois combinaisons de la vision stéréoscopique et le suivi de la tête n'ont aucun impact significatif sur la présence ($F(2,27) = 1.279$, $p\text{-value} = 0.527$). Sur une échelle de Likert de 7 (7 représente un très bon sentiment de présence), les participants avaient un bon sentiment de présence avec des évaluations moyennes de 4.243, 4.244 et 4.290 pour ASAT, SSAT, SSST respectivement, comme le résume le tableau 7.1.

Mal du simulateur (SSQ)

L'analyse statistique révèle une influence significative des combinaisons de la vision stéréoscopique et le suivi de la tête sur le mal du simulateur à la fin des visites virtuelles SSQ2 ($F(2,27) = 7.310$, $p\text{-value} = 0.025$). Les participants dans la condition ASAT avaient des symptômes plus importants que les autres participants avec un score de 11.178 indiquant des symptômes significatifs selon le tableau 5.2. Les comparaisons paire-à-paire ont montré une différence significative uniquement entre ASAT et SSAT ($p\text{-value} = 0.019$). Aucune différence significative n'a été trouvée entre ASAT - SSST et SSAT - SSST, les participants avaient un score du SSQ2 indiquant des symptômes minimaux de 6.913 et 7.854 pour SSAT et SSST, respectivement.

Concernant l'augmentation du mal du simulateur au cours des visites, l'analyse statistique n'a révélé aucune influence significative des trois combinaisons de la vision stéréoscopique et le suivi de la tête ($F(2,27) = 0.868$, $p\text{-value} = 0.647$). L'augmentation des symptômes était similaire dans les trois conditions.

7.4 Discussion

Indépendamment des trois conditions expérimentales, globalement, les dimensions des murs sont surestimées dans l'*estimation des distances* tandis que la perception des tailles et de l'habitabilité sont sous-estimées. Ce résultat est en cohérence avec les résultats obtenus lors des expérimentations précédentes. Cette différence a été déjà discutée dans le chapitre 5, sous-section 5.4.1.

7.4.1 Estimation des distances

Les résultats obtenus indiquent une différence significative entre ASAT et SSAT. À première vue, ce résultat semble indiquer que la stéréoscopie influence l'estimation des distances. Toutefois, si nous considérons la différence entre ASAT et SSST, nous n'observons aucune différence significative. En outre, le suivi de la tête ne semble pas influencer l'estimation des distances. Ceci est appuyé par la comparaison de SSAT et SSST où aucune différence significative n'a été observée. Si la stéréoscopie seule influence l'estimation des distances, puisque le suivi de la tête seul n'a pas d'influence significative on devrait également obtenir une influence significative entre ASAT - SSST ce qui n'est pas le cas. En conséquence, tenant compte de tous les résultats ensemble, nous pensons que la stéréoscopie seule n'influence pas

l'estimation des distances. C'est la combinaison de ces deux facteurs qui influence l'estimation des distances.

Ces résultats sont conformes aux résultats des travaux précédents [CRWGT05, PdIRK⁺13, WGTCR08]. Concernant la stéréoscopie, en utilisant un grand écran, Piryankova *et al.* [PdIRK⁺13], n'ont pas trouvé une influence significative de la stéréoscopie sur l'estimation des dimensions des murs évalués avec l'estimation verbale. Globalement les distances ont été sous-estimées. Dans le contexte de la performance des tâches, dans le travail de Ragan *et al.* [RKS13], en utilisant un mur immersif, il a été demandé aux participants de compter le nombre de connexions entre des lignes horizontale et verticale. Cette tâche est principalement basée sur la perception de la profondeur afin de juger si les deux lignes s'intersectent réellement ou si elle se trouvent à des profondeurs différentes. Cette étude expérimentale examine plusieurs combinaisons de la vision stéréoscopique et du suivi de la tête. Aucune influence significative de la vision stéréoscopique n'a été observée sur la performance de la tâche en terme de nombre de connexions trouvées. En outre, Creem-Regehr *et al.* [CRWGT05] n'ont pas trouvé une influence significative de la stéréoscopie sur l'estimation des distances. Néanmoins, l'étude utilisait un HMDs.

Concernant le suivi de la tête, notre résultat est conforme aux résultats de Piryankova *et al.* [PdIRK⁺13] où aucune influence du suivi de la tête n'a été observée sur l'estimation des distances. Jones *et al.* [JSSK08] ont aussi obtenu le même résultat avec un HMD. Dans l'expérimentation, il a été demandé aux participant soit de rester stable (pour la condition sans le suivi de la tête), soit de balancer leur corps pour changer de point de vue. Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les deux conditions. Toutefois, dans le travail de Ragan *et al.* [RKS13], la présence du suivi de la tête a conduit à une amélioration de performance de la tâche de détection d'intersection. Ce résultat nous semble logique. Certes, percevoir les interactions des lignes est basée principalement sur la perception de la profondeur mais l'exploration de l'environnement sous plusieurs angles de vue permet de détecter les différences au niveau de la profondeur. En effet, deux lignes s'intersectant dans un angle de vue peuvent apparaître comme disjointes selon un autre angle de vue. Ceci est différent de notre cas.

Au vu des résultats obtenus, il semblerait qu'il y ait une influence de la combinaison de la stéréoscopie et du suivi de la tête sur l'estimation des distances. En effet, l'utilisation du suivi de la tête seul sans la stéréoscopie semble dégrader l'estimation des distances en conduisant à plus de surestimation. Toutefois, en l'absence des deux facteurs, l'estimation des distances s'améliore. En conséquence, nous pouvons dire que la présence ou l'absence des deux facteurs ensemble conduit à des performances similaires, ceci est confirmé par l'absence de différence significative entre la condition ASAT et SSST. Ceci nous semble logique car, le suivi de la tête est plus remarquable lorsque la stéréoscopie est présente et seul il semble introduire des conflits au niveau visuel et par conséquent dégrader l'estimation des distances.

7.4.2 Habitabilité

Concernant le suivi de la tête, nous n'avons pas trouvé une différence significative entre SSAT et SSST. En conséquence, nous considérons que le suivi de la tête n'a pas d'influence significative sur l'habitabilité. Concernant la stéréoscopie, les résultats ont montré une influence significative entre ASAT et SSAT. La stéréoscopie semble donc influencer l'habitabilité. Toutefois ce constat doit être validé par le résultat de la comparaison ASAT et SSST. En effet, puisque le suivi de la tête seul n'a pas d'influence significative on devrait également obtenir une influence significative entre ASAT - SSST. Cependant, nous n'observons aucune différence significative entre ces derniers. Donc, même constat que pour l'estimation des distances,

nous considérons que c'est la combinaison de ces deux facteurs qui influence l'habitabilité.

Par ailleurs, les résultats ont montré que l'habitabilité est sous-estimée lorsque les deux facteurs sont présents ou absents ensemble et elle est légèrement surestimée lorsque le suivi de la tête est utilisé sans la stéréoscopie.

7.4.3 Les tendances dans les estimations

Dans cette sous section nous parlons les tendances dans l'*estimation des distance*, de la *perception des tailles* et de l'*habitabilité* dans les trois conditions.

Les résultats de l'estimation des distances ont montré que cette dernière est meilleure lorsque la stéréoscopie est utilisée avec le suivi de la tête que lorsque ce dernier est utilisé sans la stéréoscopie. Toutefois, concernant l'habitabilité, nous avons trouvé le contraire. Cette dernière est sous-estimée lorsque la stéréoscopie est utilisée avec le suivi de la tête et plutôt légèrement surestimée lorsque le suivi de la tête est utilisé sans la stéréoscopie, comme le montre le tableau 7.1.

Cette différence peut être liée à la stratégie utilisée pour répondre. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 5, sous-section 5.4.1, l'estimation des distances était basée principalement sur une stratégie de calcul tandis que pour la perception des tailles et de l'habitabilité les participants ont essayé d'évaluer l'espace visuellement (à l'intuition). Cette stratégie est la même pour cette expérimentation et a été confirmée par le débriefing donné par les participants. Donc probablement que, la stéréoscopie aide dans la stratégie de calcul en améliorant l'estimation des distances tandis que l'impression visuelle sur les distances n'est pas affectée. Cependant, le résultat de la perception des tailles ne nous permet pas de confirmer cette interprétation car aucune influence significative n'a été trouvée pour les trois conditions pour la perception des tailles. En conséquence, nous ne pouvons pas donner une justification précise à cette différence. De plus, nous ne pouvons donc ni valider, ni invalider notre hypothèse **H1**. Ce résultat nécessite d'examiner davantage l'influence de la vision stéréoscopique en combinaison avec le suivi de la tête sur différentes méthodes d'estimation des distances.

7.4.4 Difficulté de la tâche

La vision stéréoscopique et le suivi de la tête ne semblent pas influencer la difficulté de tâche. Elle a été considérée comme plutôt difficile. Toutefois, ceci est plutôt lié à la capacité des personnes à évaluer les distances. En effet, lors du débriefing, la plupart des participants ont rapporté se sentir incapable de donner une bonne évaluation des distances et ainsi ils ont jugé la tâche comme plutôt difficile. Donc, la vision stéréoscopique et le suivi de la tête n'apportent pas réellement une aide à la visite virtuelle pour l'estimation des distances.

7.4.5 La carte cognitive

Concernant la carte cognitive, les deux facteurs et leur combinaison n'influencent pas la compréhension de l'espace, évaluée à l'aide de la carte cognitive. Ceci peut être lié à la taille de l'espace. Puisque généralement la stéréoscopie et le suivi de la tête influencent la perception des petites distances jusqu'à 2m [CV95]. La compréhension d'un petit espace dense comme un nuage de point ou des lignes intersectées comme [RKS13] peut être appuyée par l'utilisation des deux facteurs. Toutefois, lorsque l'espace est

grand et assez dégagé comme dans le cas de nos maisons, les deux facteurs ne sont pas utilisés dans la compréhension de l'espace.

7.4.6 La présence

Étrangement, la stéréoscopie et le suivi de la tête ne semblent pas influencer le sentiment de présence en EV. Plusieurs travaux ont montré que ces deux facteurs améliorent le sentiment de présence en EV [IdRF⁺01, LK08]. Sur un grand écran, les participants ont observé une course de rallye dans plusieurs conditions manipulant la stéréoscopie et le suivi de la tête [IdRF⁺01]. Les résultats ont montré que le niveau de présence augmente avec la présence des deux facteurs. De même, Lee *et al.* [LK08] ont trouvé une amélioration du sentiment de présence lorsque la vision est stéréoscopique avec le suivi de la tête. Dans ce travail, les participants ont été immergés dans un environnement de sous-marin.

Dans notre travail nous n'avons pas observé une amélioration du sentiment de présence. Toutefois, ce dernier était assez bon. Probablement, ces deux facteurs ne sont pas aussi importants lorsque d'autres facteurs sont présents comme la nature de la tâche dans l'EV. Dans notre cas, les participants devaient visiter des maisons et puisque la majorité des participants ont déjà effectué cette tâche dans la vraie vie, la visite virtuelle semblait naturelle et a probablement conduit à un bon sentiment de présence.

7.4.7 Mal du simulateur

Concernant le SSQ2, les résultats ont montré une différence significative uniquement entre ASAT et SSAT. Les symptômes sont plus importants dans ASAT, selon le tableau de l'interprétation du SSQ 5.2, les symptômes sont légèrement significatifs. Dans SSAT et SSST les symptômes à la fin des visites étaient plutôt minimaux. Comme pour l'estimation des distances, la combinaison des deux facteurs semble influencer les symptômes du mal du simulateur. La présence des deux facteurs ensemble augmente les symptômes. Nous confirmons que la stéréoscopie seule n'est pas la raison principale de cette augmentation car si c'était le cas, puisque le suivi de la tête seul n'a pas d'influence significative (SSAT - SSST) on devrait obtenir une influence significative entre ASAT - SSST ce qui n'est pas le cas. Probablement, la stéréoscopie avec le suivi de la tête induit un inconfort visuel conduisant à plus de symptômes. Ce résultat valide notre hypothèse **H2**.

La majorité des travaux précédents ont montré que la stéréoscopie et le suivi de la tête influence le mal du simulateur en EV [SLM12, KH12]. Dans le contexte des jeux vidéo, Schild *et al.* [SLM12] ont trouvé une influence significative de la stéréoscopie sur le mal du simulateur. Le score de ce dernier était plus élevé lorsque la vision était stéréoscopique. Dans cette étude le suivi de la tête n'a pas été examiné car, dans les deux conditions, le sujet était assis sans mouvement. De même, Keshavarz *et al.* [KH12] ont trouvé une influence significative de la stéréoscopie sur le mal du simulateur. Les participants ont regardé une vidéo avec ou sans stéréoscopie. Les participants avec la vision stéréoscopique ont obtenu un score plus élevé. McGee [McG98] a examiné l'influence du suivi de la tête sur le mal du simulateur durant une tâche de navigation dans un bureau virtuel en utilisant un HMD et une souris pour la navigation. Les résultats ont montré que le score du mal du simulateur augmente davantage avec l'utilisation du suivi de la tête.

Par ailleurs, Jinjakam *et al.* ont examiné plutôt l'influence de la distance interoculaire dans la vision stéréoscopique en comparant une distance de 65 mm et de 20 mm. Les résultats ont montré que les deux cas provoquent des symptômes du mal du simulateur. Cependant, la distance interoculaire de 20mm

augmente davantage les symptômes. Ce résultat nous semble logique car la distance de 20 mm n'est pas adaptée à une vision normale ce qui conduit principalement à un inconfort visuel plus important.

Concernant l'augmentation des symptômes, aucune influence significative des trois conditions n'a été observée sur le score du mal du simulateur. Il semblerait que les deux facteurs ensemble (ASAT) provoquent des symptômes plus importants au début de l'exposition à l'EV mais qui augmentent au cours des visites de manière similaire aux deux autres conditions SSST et SSAT.

7.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'influence de la stéréoscopie et du suivi de la tête sur l'estimation des distances et les visites virtuelles. Des travaux précédents ont trouvé différents résultats concernant l'influence de ces deux facteurs que ce soit sur l'estimation des distances, le niveau de présence ou le mal du simulateur, etc.

Nous avons réalisé une étude expérimentale dans laquelle nous avons examiné trois combinaisons : 1) vision stéréoscopique avec le suivi de la tête, 2) vision monoscopique avec le suivi de la tête et 3) vision monoscopique sans le suivi de la tête. Dans notre étude expérimentale, nous avons examiné plusieurs variables dépendantes. Particulièrement, nous avons vérifié l'influence de ces trois conditions sur l'estimation des distances et des volumes, évaluée selon plusieurs manières : l'*estimation des distances*, la *perception des tailles* et l'*habitabilité*. Les résultats ont montré que la combinaison des deux facteurs ensemble influence uniquement l'*estimation des distances* et l'*habitabilité*. En outre, l'*estimation des distances* semble meilleure avec la présence des deux facteurs tandis que l'*habitabilité* semble se dégrader dans cette condition expérimentale. Ces résultats indiquent que l'influence de la stéréoscopie et le suivi de la tête est différente selon la méthode d'estimation des distances utilisée. Toutefois, afin de valider cette supposition, il est nécessaire d'examiner l'influence de ces conditions sur d'autres méthodes d'estimation des distances comme la marche directe. Ce résultat, nous a pas permis de valider ni de invalider notre hypothèse **H1**.

Par ailleurs, la présence des deux facteurs ensemble semble provoquer des symptômes du mal du simulateur plus importants ainsi, nous validons notre hypothèse **H2**. Ce résultat est en cohérence avec les travaux précédents qui ont montré que la stéréoscopie et le suivi de la tête provoquent le mal du simulateur. Cependant, nous précisons que dans notre expérimentation, selon la table de l'interprétation du score du mal du simulateur, les symptômes étaient soit minimaux soit légèrement significatifs (lorsque les deux facteurs sont présents). En conséquence, même dans la présence des deux facteurs ensemble, les symptômes ne sont pas sévères. Par ailleurs, en l'occurrence, les symptômes sont plus importants uniquement au début de l'exposition à l'EV. Le score du mal du simulateur augmente au cours des visites virtuelles de la même manière dans toutes les conditions.

En plus de l'estimation des distances et le mal du simulateur, nous avons examiné l'influence des trois conditions sur la présence, la carte cognitive de l'environnement et la difficulté de la tâche où nous n'avons pas observé d'influences significatives.

Par cette étude nous avons voulu examiner l'intérêt de la vision stéréoscopique et du suivi de la tête sur la visite virtuelle afin de vérifier la nécessité d'améliorer la projection hybride présentée dans le chapitre 6 en rajoutant ces deux facteurs dans le futur. D'après ces résultats, nous avons remarqué qu'il n'y a pas de différence significative entre le cas où les deux facteurs sont présents ensemble ou absents ensemble. En conséquence, nous pouvons conclure que la projection hybride telle qu'elle a été présentée, sans la

stéréoscopie et le suivi de la tête reste valide pour la revue de projet architectural, et l'intégration des deux facteurs serait secondaire.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous présentons un bilan de l'ensemble des travaux que nous avons effectués. Nous résumons l'ensemble des résultats obtenus durant les différentes études expérimentales que nous avons menées et les recommandations que nous pouvons en tirer. Nous finirons en proposant quelques unes des perspectives que nous envisageons pour la suite de ce travail.

8.1 Bilan

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à la problématique de l'estimation des distances et des volumes en EV, dans un contexte de revue de projet architectural. Notre objectif était de proposer un outil de revue de projet architectural efficace permettant un bon confort lors des visites virtuelles et une bonne estimation des distances et des volumes. Notre choix d'étudier l'estimation des distances et des volumes s'est imposé car la majorité des décisions prises lors des revues de projet y sont liées.

Dans un premier temps, nous avons décrit le concept de réalité virtuelle et ses différentes formes d'usage dans plusieurs domaines notamment le domaine architectural et la revue de projet. Avant de traiter la problématique de l'estimation des distances en EV dans la revue de projet, nous avons proposé un large éventail des facteurs influençant l'estimation des distances en EV. La partie I était consacrée à cette vision globale du domaine qui nous intéresse.

Ces facteurs étant très nombreux, à l'aide l'état de l'art, nous avons essayé d'en cibler quelques uns que nous avons jugés comme des paramètres importants lors de la phase de conception de notre outil de revue de projet architectural. Nous avons donc dans un second temps, dans la partie II, effectué la conception de l'outil de revue de projet architectural CIMBEES. Lors de cette phase, nous avons identifié les besoins du projet qui nous ont servi de base pour la conception de l'outil de revue de projet. En outre, nous avons conçu les maquettes numériques pour évaluer l'outil de revue de projet lors des visites virtuelles de maisons.

Dans la phase de l'évaluation, nous avons d'abord présenté les évaluations possibles d'un outil de revue de projet architectural. Puisque nous nous sommes focalisés sur l'estimation des distances et des volumes en EV, nous avons présenté les différentes méthodes d'estimation des distances pour choisir une méthode adaptée à notre contexte de visite virtuelle. Nous avons opté pour l'estimation verbale et le jugement de faisabilité, car les deux méthodes nous permettent d'évaluer les distances dans des visites virtuelles sans demander aux utilisateurs une quantification directe (en mètre). Nous avons adapté ces deux

méthodes à notre contexte en élaborant un questionnaire spécifique à la visite virtuelle. Ce questionnaire était divisé en deux groupes de tâches.

1. **Le CS1** : un questionnaire regroupant plusieurs groupes de questions pour une évaluation assez complète de l'outil de revue de projet.
 - L'estimation des distances : un groupe de questions permettant de juger des dimensions des murs.
 - la perception des tailles : un groupe de questions incitant les participants à imaginer différents aménagements intérieurs en mettant des meubles à des endroits spécifiques pour juger de la perception des tailles des objets.
 - L'habitabilité : un groupe de question pour évaluer le confort de vie dans la maison.
 - La difficulté de la tâche : une question pour évaluer la difficulté de la visite virtuelle et l'estimation des distances.
2. **Le CS2** : cette tâche consiste à redessiner le plan de la maison et le chemin de navigation pour évaluer la compréhension du plan de la maison lors de la visite virtuelle.

Lors des expérimentations effectuées, nous avons utilisé d'autres questionnaires standards en complément à ce questionnaire.

Nous avons donc consacré la partie III aux études expérimentales menées dans le cadre de l'évaluation et l'amélioration de l'outil de revue de projet architectural. Dans les trois chapitres de cette partie, nous avons souligné nos motivations et nous avons décrit les protocoles expérimentaux que nous avons mis en place pour évaluer l'outil de revue de projet. À l'issue des expérimentations nous avons proposé des recommandations pour les outils de revue de projet utilisant un EV similaire au notre.

Dans le chapitre 5 nous avons cherché à trouver des paramètres permettant une bonne estimation des distances et un bon confort d'utilisation. Nous nous sommes intéressés à l'influence des trois facteurs : 1) la vitesse de navigation, 2) l'ameublement des maisons et 3) le profil cognitif des utilisateurs. Pour la vitesse de navigation nous avons examiné trois vitesses : une vitesse normale (1.1 m/s), une vitesse lent (0.55 m/s) et une vitesse dynamique variable entre les deux précédentes en fonction du dégagement de l'espace. Pour l'ameublement des maisons nous avons conduit les visites virtuelles dans des maisons meublées et des maisons non meublées. Concernant le profil cognitif des utilisateurs, nous avons examiné la performance des visites virtuelles en fonction du profil cognitif VAK (visuel, auditif et kinesthésique).

L'analyse des données du protocole révèle plusieurs résultats importants :

1. Une différence des tendances dans l'estimation des distances selon la tâche demandée : l'estimation des dimensions des murs avec une unité métrique (en mètre) est surestimée tandis que la perception des tailles et de l'habitabilité sont sous-estimées.
2. Une différence entre les individus selon leur profil cognitif. Les sujets avec le profil visuel sont plus précis dans l'estimation des distances. Les sujets avec le profil kinesthésique ont trouvé la tâche de visite virtuelle plus facile. Les sujets avec le profil auditif ont eu un bon sentiment de présence.
3. Une différence dans l'estimation des distances selon la vitesse de navigation lente, normale et dynamique. L'estimation des distances est meilleure avec les vitesses : lente et dynamique. La vitesse lente facilite la tâche de visite virtuelle et offre un bon sentiment de présence.

4. Une estimation des distances et des tailles similaire entre les deux environnements : maison meublée et maison non meublée, et une sous estimation de l'habitabilité dans les maisons meublées. Ces dernières permettent une meilleure compréhension de l'environnement virtuel.

À l'issue de cette analyse nous avons proposé d'effectuer les visites virtuelles dans des maisons meublées et d'utiliser une vitesse lente pour la navigation dans la scène virtuelle.

D'après notre première expérimentation, le mur immersif que nous avons utilisé, tout comme les écrans 3D, permettent une revue de projet collaborative. Toutefois, il souffre d'un problème de visibilité entre le sujet et l'écran. En d'autre terme, le sujet face à l'écran n'a pas la possibilité de voir la partie de la scène qui se trouve entre lui et l'écran d'affichage (lorsque la visite se fait à la première personne). Ceci peut être à l'origine de la sous estimation de l'habitabilité que nous avons identifiée dans la première expérimentation.

Pour résoudre ce problème nous avons proposé d'élargir le champ de vision vertical de telle sorte que les objets proches qui se trouvent dans l'espace personnel (à moins de 2 mètres) puissent être perçus. Pour ce faire nous avons développé une technique de rendu que nous avons évaluée dans la deuxième expérimentation.

Dans le chapitre 6, nous avons décrit la projection hybride. Elle combine deux types de projection : la projection perspective pour le rendu de la partie centrale de l'écran et la projection cylindrique pour le rendu des deux extrémités de l'écran. Les objectifs de cette projection étaient :

1. Élargir le champ de vision géométrique vertical jusqu'à 135° (champ de vision de l'être humain), pour permettre de mieux percevoir l'espace personnel (jusqu'à 2 mètres) autour de l'utilisateur.
2. Minimiser les distorsions liées au rendu pour préserver l'estimation des distances, importante dans la revue de projet architectural.

Nous avons effectué une deuxième étude expérimentale afin de vérifier la validité de nos objectifs. Dans un protocole nous avons comparé l'estimation des distances et des volumes entre la projection hybride et la projection perspective ordinaire. Les résultats obtenus ont confirmé que la projection hybride permet d'élargir le champ de vision géométrique vertical sans altérer l'estimation des distances et des volumes en environnement virtuel.

La projection hybride est proposée sans la vision stéréoscopique ni le suivi de la tête. Dans notre technique, nous avons calculé et fixé les angles des deux projections, perspective et cylindrique, en considérant le centre de l'écran comme l'origine du repère (x,y) et la position de la caméra virtuelle. Pour rajouter la vision stéréoscopique et le suivi de la tête, nous devons doubler les calculs des angles en effectuant un calcul par œil tenant compte de la disparité binoculaire. En outre, pour le suivi de la tête, nous devons mettre à jour le calcul des angles de projection à chaque fois que l'utilisateur change la position de sa tête qui correspond à la position de la caméra virtuelle. Toutefois, d'après les travaux précédents, ces deux facteurs ne semblent pas toujours influencer l'estimation des distances. En l'occurrence, la projection hybride peut être utilisée de manière efficace même sans la vision stéréoscopique et le suivi de la tête.

Dans le chapitre 7, nous avons présenté une dernière étude expérimentale exploitant l'influence de plusieurs combinaisons de la vision stéréoscopique et du suivi de la tête sur les visites virtuelles de maisons meublées et l'estimation des distances. Particulièrement, les résultats n'ont montré aucune différence significative entre la condition où les deux facteurs étaient présents et celle sans les deux facteurs. En conséquence, à la fin de cette étude nous validons l'utilisation de la projection hybride même sans la stéréoscopie ni le suivi de la tête.

8.2 Perspective

De nombreuses perspectives apparaissent à la suite du travail décrit dans ce document, notamment concernant l'investigation de l'influence des facteurs étudiés sur d'autres tâches et éléments de l'outil de revue de projet architectural.

8.2.1 Le profil cognitif

Nous avons pu constater que le profil cognitif joue un rôle sur le confort de la visite virtuelle et l'estimation des distances. Nous pensons que l'adaptation de l'outil de revue de projet pour chaque profil pourrait améliorer les visites virtuelles pour ces différents profils.

Le profil étant caractérisé par des préférences de modalités sensorielles particulières, nous pensons qu'il serait pertinent d'examiner l'effet de l'ajout d'indices selon le profil cognitif. Ainsi, nous suggérons :

1. Pour le profil visuel : la comparaison de l'influence de plusieurs niveaux de réalisme des scènes sur l'estimation des distances et sur le niveau de présence.
2. Pour le profil kinesthésique : examiner l'influence de l'ajout de tâches à réaliser sur l'estimation des distances et sur le niveau de présence.
3. Pour le profil auditif : examiner l'influence de l'ajout du son des pas de marche ou d'autres objets comme le bruit d'une montre murale sur l'estimation des distances.

8.2.2 La projection hybride

Nous avons validé le principe de la projection hybride à travers une expérience où nous l'avons examiné relativement à l'estimation des distances et des volumes et la compréhension de la scène virtuelle. Dans la dernière expérimentation, nous avons confirmé que, même sans la stéréoscopie ni le suivi de la tête, la projection hybride est adaptée pour les visites virtuelles de maisons. Il serait intéressant de valider notre technique dans d'autres tâches que celle de l'estimation des distances comme la navigation libre et la manipulation des objets.

Dans nos expérimentations, nous avons utilisé une navigation guidée selon un chemin prédéfini afin d'avoir une durée de visite similaire entre les différents sujets et avoir le même temps d'exposition à l'EV. Toutefois, dans l'utilisation futur de l'outil de revue de projet architectural, les clients potentiels visiteront les maisons avec une navigation libre. La projection hybride permet d'améliorer la perception de l'espace autour de l'utilisateur, en l'occurrence, elle peut jouer un rôle important dans l'amélioration de la performance de la navigation libre avec le mur immersif, notamment le nombre et le temps de collisions. En effet, lorsque l'utilisateur se déplace avec une navigation libre, il peut entrer en collision avec un objet qui se trouve dans son espace personnel. Avec la projection hybride l'utilisateur comprendra plus rapidement qu'il est en collision avec un objet qu'il visualise sur l'écran et en conséquence, il peut s'éloigner et changer sa trajectoire rapidement. Tandis qu'avec la projection perspective classique, il mettra plus de temps, d'abord pour comprendre la raison de son blocage et ensuite pour éviter l'objet en collision qu'il n'arrive pas à voir, en changeant de direction. Donc, dans ce type de tâche, la projection hybride peut diminuer de manière assez importante le nombre et le temps de collisions.

Par ailleurs, il peut être intéressant d'évaluer son utilisation sur la manipulation d'objets pour une tâche d'aménagement des pièces dans une visite virtuelle. La manipulation des objets nécessite généralement de

sélectionner des objets à porter de main se trouvant dans l'espace personnel. Dans ce cas, l'utilisateur doit voir ces objets pour être capable de les sélectionner et les poser par la suite dans un endroit se trouvant dans son espace personnel. Dans cette tâche, nous remarquons que la projection hybride peut aussi jouer un rôle important dans la performance de la manipulation des objets notamment, le temps de sélection et de relâchement des objets.

8.2.3 La stéréoscopie et le suivi de la tête

Nous avons pu constater que la stéréoscopie et le suivi de la tête influencent l'estimation des distances différemment en fonction de la méthode utilisée pour juger les distances. Nous proposons de vérifier ce constat en examinant l'influence de ces deux facteurs sur d'autres méthodes d'estimation des distances comme la marche directe, le pointage, etc.

Dans notre dernière expérimentation, nous avons constaté que la manière de combiner les deux facteurs influence l'estimation des distances, et que le suivi de la tête seul n'a pas d'influence significative. Il serait intéressant d'examiner l'influence de ce dernier dans d'autres dispositifs d'affichage comme les HMDs. En outre, examiner le comportement des utilisateurs dans le cas d'un mur immersif et d'un HMD, en mesurant les mouvements de la tête lorsque le suivi est utilisé. Ceci est intéressant car avec le mur immersif, l'utilisateur n'est pas totalement entouré par la scène virtuelle ce qui peut l'inciter à rester concentré sur l'écran en face de lui et donc conduit à des mouvements de tête moins importants. En l'occurrence, le suivi de la tête peut être inutile. Cependant, avec le HMD l'utilisateur est totalement immergé ce qui peut l'encourager à bouger sa tête davantage. En conséquence, le suivi de la tête peut engendrer une influence significative sur l'estimation des distances.

Bibliographie

- [ALM⁺12] Jérôme Ardouin, Anatole Lécuyer, Maud Marchal, Clément Riant, and Eric Marchand. *FlyVIZ : A novel display device to provide humans with 360° vision by coupling catadioptric camera with hmd*. In *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 41–44. ACM, 2012.
- [ALMM14] J. Ardouin, A. Lécuyer, M. Marchal, and E. Marchand. Stereoscopic rendering of virtual environments with wide field-of-views up to 360°. In *Virtual Reality (VR), 2014 IEEE*, pages 3–8, 2014.
- [Arg14] Ferran Argelaguet. Adaptive navigation in virtual environments. In *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, 2014.
- [ATDIR⁺10] Ivelina V. Alexandrova, Paolina T. Teneva, Stephan de la Rosa, Uwe Kloos, Heinrich H. Bühlhoff, and Betty J. Mohler. Egocentric distance judgments in a large screen display immersive virtual environment. In *Proceedings of the 7th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization, APGV '10*, pages 57–60. ACM, 2010.
- [BASOL15] Gerd Bruder, Ferran Argelaguet Sanz, Anne-Hélène Olivier, and Anatole Lécuyer. Distance Estimation in Large Immersive Projection Systems, Revisited. In *IEEE Virtual Reality*, Arles, France, March 2015.
- [BBB⁺15] J. Bertrand, D. Brickler, S. Babu, K. Madathil, M. Zelaya, Tianwei Wang, J. Wagner, A. Gramopadhye, and Jun Luo. The role of dimensional symmetry on bimanual psychomotor skills education in immersive virtual environments. In *Virtual Reality (VR), 2015 IEEE*, pages 3–10, March 2015.
- [BGH02] Doug A. Bowman, Joseph L. Gabbard, and Deborah Hix. A survey of usability evaluation in virtual environments : Classification and comparison of methods. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 11(4) :404–424, August 2002.
- [BLB⁺02] Jim Blascovich, Jack Loomis, Andrew C. Beall, Kimberly R. Swinth, Crystal L. Hoyt, and Jeremy N. Bailenson. Immersive virtual environment technology as a methodological tool for social psychology, 2002.
- [BSP15] T. Bogoni, R. Scarparo, and M. Pinho. A virtual reality simulator for training endodontics procedures using manual files. In *3D User Interfaces (3DUI), 2015 IEEE Symposium on*, pages 39–42, March 2015.

- [CBB12] JenniferL. Campos, JohnS. Butler, and HeinrichH Bülthoff. Multisensory integration in the estimation of walked distances. *Experimental Brain Research*, 218(4) :551–565, 2012.
- [CC05] V. Chislett and A. Chapman. Vak learning styles self-assessment questionnaire, 2005.
- [CMRCL09] Gabriel Cirio, Maud Marchal, Tony Regia-Corte, and Anatole Lécuyer. The magic barrier tape : A novel metaphor for infinite navigation in virtual worlds with a restricted walking workspace. In *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '09*, pages 155–162, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [CRWGT05] Sarah H. Creem-Regehr, Peter Willemsn, Amy A. Gooch, and William B. Thompson. The Influence of Restricted Viewing Conditions and Egocentric Distance Perception : Implications for Real and Virtual environments. *Perception*, 34 :191–204, 2005.
- [CSC89] R.F. Coyne, E. Subrahmanian, and Carnegie-Mellon University. Engineering Design Research Center. *Computer Supported Creative Design : A Pragmatic Approach*. [Carnegie Mellon University], Engineering Design Research Center, 1989.
- [CV95] J. E. Cutting and P. M. Vishton. Perceiving layout and knowing distances : the integration, relative potency and contextual use of different information about depth. In W. Epstein and S. Rogers, editors, *Handbook of perception and Cognition.*, volume 5 : Perception of Space and Motion, pages 69–117. 1995.
- [CVC⁺11] Marcio Cabral, Peter Vangorp, Gaurav Chaurasia, Emmanuelle Chapoulie, Martin Hachet, and George Drettakis. A multimode immersive conceptual design system for architectural modeling and lighting. In *Proceedings of the 2011 IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 3DUI '11*, pages 15–18, Washington, DC, USA, 2011. IEEE Computer Society.
- [CWHW09] Carlos M. Coelho, Allison M. Waters, Trevor J. Hine, and Guy Wallis. The use of virtual reality in acrophobia research and treatment. *Journal of Anxiety Disorders*, 23(5) :563 – 574, 2009.
- [DAM⁺07] PhillipS. Dunston, LauraL. Arns, JamesD. Mcglothlin, GregoryC. Lasker, and AdamG. Kushner. An immersive virtual reality mock-up for design review of hospital rooms. *7th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, pages 22–23, 2007.
- [DC03] Mary C Dyson and Silvio Barreto Campello. Evaluating virtual learning environments : what are we measuring ? *Electronic Journal of e-Learning*, 1(1) :11–20, 2003.
- [DCT06] Fulvio Domini, Corrado Caudek, and Hadley Tassinari. Stereo and motion information are not independently processed by the visual system. *Vision Research*, 46(11) :1707 – 1723, 2006.
- [DLE⁺13] Perret David, Dominjon Lionel, Loup-Escande Emilie, Erhel Séverine, Jamet Eric, Michinov Nicolas, Andriot Claude, Gravez Philippe, and Bouchet Alexandre. Virtuali-teach : La réalité virtuelle entre dans les lycées. In *9èmes journées de l'Association*

Française de Réalité Virtuelle, Augmentée, Mixte et d'Interaction 3D, Laval, France, 2013.

- [Dod04] Neil A. Dodgson. Variation and extrema of human interpupillary distance. In *Proc. SPIE 5291*, pages 36–46, 2004.
- [dQeOU02a] Université du Québec en Outaouais (UQO). Questionnaire sur les cybermalaises. http://w3.uqo.ca/cyberpsy/docs/qaires/ssq/SSQ_vf.pdf, 2002.
- [dQeOU02b] Université du Québec en Outaouais (UQO). Questionnaire sur l'état de présence. http://w3.uqo.ca/cyberpsy/docs/qaires/pres/QEP_vf.pdf, 2002.
- [DRRT07] George Drettakis, Maria Roussou, Alex Reche, and Nicolas Tsingos. Design and evaluation of a real-world virtual environment for architecture and urban planning. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 16(3) :318–332, 2007.
- [DSFW⁺10] D.V.S.X. De Silva, W.A.C. Fernando, S.T. Worrall, S.L.P. Yasakethu, and A.M. Kondoz. Just noticeable difference in depth model for stereoscopic 3d displays. In *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), 2010*, pages 1219–1224, July 2010.
- [EL87] David W. Eby and Jack M. Loomis. A study of visually directed throwing in the presence of multiple distance cues. *Perception and Psychophysics*, 41(4) :308–312, 1987.
- [FFW07] Philip W. Fink, Patrick S. Foo, and William H. Warren. Obstacle avoidance during walking in real and virtual environments. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 4(1), 2007.
- [FMA⁺06] Philippe Fuchs, Guillaume Moreau, Bruno Arnaldi, Pascal Guitton, and François d'Aubert. *Le traité de la réalité virtuelle. Volume 4. , Les applications de la réalité virtuelle*. Collection Sciences mathématiques et informatique. École des Mines de Paris, Paris, 2006.
- [GDB⁺98] Simon R. Goerger, Rudolph P. Darken, Mark A. Boyd, Todd A. Gagnon, Stewart W. Liles, Joseph A. Sullivan, and John P. Lawson. Spatial knowledge acquisition from maps and virtual environments in complex architectural spaces. In *Proceedings of the 16th Applied behavioral Science Symposium*, 2223, 1998.
- [GHS99] J.L. Gabbard, D. Hix, and J.E. Swan. User-centered design and evaluation of virtual environments. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 19(6) :51–59, Nov 1999.
- [GL13] Yu Guan and Chang-Tsun Li. A robust speed-invariant gait recognition system for walker and runner identification. In *in Proc. the 6th IAPR International Conference on Biometrics (ICB'13)*, pages 1–8. IAPR, 2013.
- [GNP⁺10] Timofey Y. Grechkin, Tien Dat Nguyen, Jodie M. Plumert, James F. Cremer, and Joseph K. Kearney. How does presentation method and measurement protocol affect distance estimation in real and virtual environments? *ACM Trans. Appl. Percept.*, 7(4) :26 :1–26 :18, 2010.
- [Gog61] W.C. Gogel. Convergence as a cue to the perceived distance of objects in a binocular configuration. *The Journal of Psychology : Interdisciplinary and Applied*, 52 :303–3015, 1961.

- [GSCRT10] Michael Geuss, Jeanine Stefanucci, Sarah Creem-Regehr, and William B. Thompson. Can i pass ? : Using affordances to measure perceived size in virtual environments. In *Proceedings of the 7th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, APGV '10, pages 61–64, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [GUI56] J. P. GUILFORD. The guilford-zimmerman aptitude survey. *The Personnel and Guidance Journal*, 35(4) :219–223, 1956.
- [HC11] Hanoch Hauptman and Arie Cohen. The synergetic effect of learning styles on the interaction between virtual environments and the enhancement of spatial thinking. *Computers and Education*, 57(3) :2106 – 2117, 2011.
- [HF93] D. Henry and T. Furness. Spatial perception in virtual environments : Evaluating an architectural application. In *Virtual Reality Annual International Symposium, 1993., 1993 IEEE*, pages 33–40, Sep 1993.
- [HKL07] Osvaldo Hu, Celso Kurashima, and Roseli Lopes. Panoramic images composition with positioning maps for virtual telepresence. In *IX Symposium on Virtual and Augmented Reality SVR 2007*, 2007.
- [HPE+15] G. Henshall, S.R. Pop, M.R. Edwards, L. ap Cenydd, and N.W. John. Towards a high fidelity simulation of the kidney biopsy procedure. In *Virtual Reality (VR), 2015 IEEE*, pages 191–192, March 2015.
- [ICu] ICube. Laboratoire icube. <http://icube.unistra.fr/>.
- [IdRF+01] W. A. IJsselsteijn, H. d. Ridder, J. Freeman, S. E. Avons, and D. Bouwhuis. Effects of stereoscopic presentation, image motion, and screen size on subjective and objective corroborative measures of presence. *Presence*, 10(3) :298–311, June 2001.
- [Ima73] Vacit Imamoglu. The effect of furniture density on the subjective evaluation of spaciousness and estimation of size of rooms. In *Architectural Psychology - Proceedings of the Conference held at Lund University*, IAPS, Lund, Sweden, 06/1973 1973. Lund University, Lund University.
- [IRA06] V. Interrante, B. Ries, and L. Anderson. Distance perception in immersive virtual environments, revisited. In *Virtual Reality Conference, 2006*, pages 3–10, March 2006.
- [JA.83] Thomson JA. Is continuous visual monitoring necessary in visually guided locomotion ? *J Exp Psychol Hum Percept Perform.*, 9(3) :427–443, 1983.
- [JSSK08] A. Jones, J. Swan, G. Singh, and E. Kolstad. The effects of virtual reality, augmented reality, and motion parallax on egocentric depth perception. In *Virtual Reality Conference, 2008. VR '08. IEEE*, pages 267–268, March 2008.
- [Kal99] Roy S Kalawsky. Vruse-a computerised diagnostic tool : for usability evaluation of virtual/synthetic environment systems. *APPLIED ERGONOMICS*, 30(1) :11–25, 1999.
- [KDC+03] Robert S. Kennedy, Julie M. Drexler, Daniel E. Compton, Kay M. Stanney, Susan Lanham, and Deborah L. Harm. Configural scoring of simulator sickness, cybersickness and space adaptation syndrome : Similarities and differences ? *Virtual and Adaptive*

Environments : Applications, Implications, and Human Performance, pages 247–278, 2003.

- [KFR07] Atul Khanzode, Martin Fischer, and Dean Reed. Challenges and benefits of implementing virtual design and construction technologies for coordination of mechanical, electrical, and plumbing systems on large healthcare project. In *Proceedings of CIB 24th W78 Conference*, pages 205–212, 2007.
- [KH12] B. Keshavarz and H. Hecht. Stereoscopic viewing enhances visually induced motion sickness but sound does not. *Presence*, 21(2) :213–228, May 2012.
- [KHSS14] Jonathan W. Kelly, William W. Hammel, Zachary D. Siegel, and Lori A. Sjolund. Recalibration of perceived distance in virtual environments occurs rapidly and transfers asymmetrically across scale. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 20(4) :588–595, 2014.
- [KLBL93] Robert S. Kennedy, Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, and Michael G. Lilienthal. Simulator sickness questionnaire : An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3) :203–220, 1993.
- [KoCGfMAC96] R.S. Kalawsky, Advisory Group on Computer Graphics, Support Initiative for Multimedia Applications, and Higher Education Funding Councils. Joint Information Systems Committee. *Exploiting Virtual Reality Techniques in Education and Training : Technological Issues*. Report series. Advisory Group on Computer Graphics, 1996.
- [KPSD08] RobertV. Kenyon, Moses Phenany, Daniel Sandin, and Thomas Defanti. Accommodation and size-constancy of virtual objects. *Annals of Biomedical Engineering*, 36(2) :342–348, 2008.
- [KSS⁺09] E. Klein, J.E. Swan, G.S. Schmidt, M.A. Livingston, and O.G. Staadt. Measurement protocols for medium-field distance perception in large-screen immersive displays. In *Virtual Reality Conference, 2009. VR 2009. IEEE*, pages 107–113, March 2009.
- [LK03] Jack M. Loomis and Joshua M. Knapp. Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. In *Virtual and Adaptive Environments*, L. J. Hettinger and M. W. Haas, Eds. Erlbaum, Mahwah, pages 21–46, 2003.
- [LK08] Sungkil Lee and Gerard Jounghyun Kim. Effects of visual cues and sustained attention on spatial presence in virtual environments based on spatial and object distinction. *Interacting with Computers*, 20(4–5) :491 – 502, 2008.
- [LSR06] JosephS. Lappin, AmyL. Shelton, and JohnJ. Rieser. Environmental context influences visually perceived distance. *Perception and Psychophysics*, 68(4) :571–581, 2006.
- [MCBT04] C. Mackie, J. Cowden, Doug A. Bowman, and W. Thabet. Desktop and immersive tools for residential home design. In *Proceedings of CONVR Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, pages 63–70, 2004.
- [McG98] Michael K. McGee. *Assessing Negative Side Effects in Virtual Environments*. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.

- [MCRTB10] Betty J. Mohler, Sarah H. Creem-Regehr, William B. Thompson, and Heinrich H. Bühlhoff. The effect of viewing a self-avatar on distance judgments in an hmd-based virtual environment. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 19(3) :230–242, June 2010.
- [MMP06] Kurt D. Maldovan, John I. Messner, and Mera Faddoul Pe. Frameworks for reviewing mock-ups in an immersive environment. In *CONVR 2006 : 6th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, pages 3–4, 2006.
- [MRB06] Jingjing Meng, John J. Rieser, and Bobby Bodenheimer. Distance estimation in virtual environments using bisection. In *Proceedings of the 3rd Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, APGV '06, pages 146–146, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [MRC⁺] Ronald R. Mourant, Prasanna Rengarajan, Daniel Cox, Yingzi Lin, and Beverly K. Jaeger. The effect of driving environments on simulator sickness. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 51, pages 1232 – 1236.
- [MS06] Fischer Martin A. Majumdar, Tulika and Benedict R. Schwegler. Conceptual design review with a virtual reality mock-up model. *Building on IT : Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, 2006.
- [MT95] D.C. Miller and J.A. Thorpe. Simnet : the advent of simulator networking. *Proceedings of the IEEE*, 83(8) :1114–1123, Aug 1995.
- [NCDT09] A. Naceri, R. Chellali, F. Dionnet, and S. Toma. Depth perception within virtual environments : A comparative study between wide screen stereoscopic displays and head mounted devices. In *Future Computing, Service Computation, Cognitive, Adaptive, Content, Patterns, 2009. COMPUTATIONWORLD '09. Computation World :*, pages 460–466, Nov 2009.
- [NGA⁺13] Myura Nagendran, Kurinchi Selvan Gurusamy, Rajesh Aggarwal, Marilena Loizidou, and Brian R Davidson. Virtual reality training for surgical trainees in laparoscopic surgery. In *Cochrane Database of Systematic Reviews 2013, Issue 8. Art. No. : CD006575.*, Aug 2013.
- [NH14] Urban Nulden and Christian Hardless. Activity visualization and formative assessment in virtual learning environments, 2014.
- [Pal02] S. Palmisano. Consistent stereoscopic information increases the perceived speed of vection in depth. *Perception*, 31 :463–480, 2002.
- [PC03] Dennis R. Proffitt and Corrado Caudek. *Depth Perception and the Perception of Events*. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [PdIRK⁺13] Ivelina V. Piryankova, Stephan de la Rosa, Uwe Kloos, Heinrich H. Bühlhoff, and Betty J. Mohler. Egocentric distance perception in large screen immersive displays. *Displays*, 34(2) :153 – 164, 2013.

- [PKCR05] Jodie M. Plumert, Joseph K. Kearney, James F. Cremer, and Kara Recker. Distance perception in real and virtual environments. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 2(3) :216–233, 2005.
- [PPZ⁺12] Kaloian Petkov, Charilaos Papadopoulos, Min Zhang, Arie E. Kaufman, and Xianfeng Gu. Interactive visibility retargeting in vr using conformal visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(7) :1027–1040, jan 2012.
- [PR08] Thomas D. Parsons and Albert A. Rizzo. Affective outcomes of virtual reality exposure therapy for anxiety and specific phobias : A meta-analysis. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 39(3) :250 – 261, 2008.
- [PRKI10] L. Phillips, B. Ries, M. Kaeding, and V. Interrante. Avatar self-embodiment enhances distance perception accuracy in non-photorealistic immersive virtual environments. In *Virtual Reality Conference (VR), 2010 IEEE*, pages 115–1148, March 2010.
- [RBS09] Bernhard E. Riecke, Pooya Amini Behbahani, and Chris D. Shaw. Display size does not affect egocentric distance perception of naturalistic stimuli. In *Proceedings of the 6th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization, APGV '09*, pages 15–18, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [RG79] Brian Rogers and Maureen Graham. Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, 8(2) :125–134, 1979.
- [RG82] Brian Rogers and Maureen Graham. Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision Research*, 22(2) :261 – 270, 1982.
- [RKSB13] E. D. Ragan, R. Kopper, P. Schuchardt, and D. A. Bowman. Studying the effects of stereo, head tracking, and field of regard on a small-scale spatial judgment task. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(5) :886–896, May 2013.
- [RSD78] Kenneth J. Dunn Rita Stafford Dunn. Teaching students through their individual learning styles : A practical approach. *Reston, VA : Reston Publishing Company, Prentice-Hall Division.*, 1978.
- [RVH13] Rebekka S. Renner, Boris M. Velichkovsky, and Jens R. Helmert. The perception of egocentric distances in virtual environments - a review. *ACM Comput. Surv.*, 46(2) :23 :1–23 :40, December 2013.
- [RW05] Adam R. Richardson and David Waller. The effect of feedback training on distance estimation in virtual environments. *Applied Cognitive Psychology*, 19 :1089–1108, 2005.
- [RW07] Adam R. Richardson and David Waller. Interaction with an immersive virtual environment corrects users’ distance estimates. *Human Factors*, 49(3) :507–517, 2007.
- [RWCB12] E.D. Ragan, C. Wilkes, Yong Cao, and D.A. Bowman. The effects of virtual character animation on spatial judgments. In *Virtual Reality Short Papers and Posters (VRW), 2012 IEEE*, pages 141–142, March 2012.

- [SCRTW05] Cynthia S. Sahn, Sarah H. Creem-Regehr, William B. Thompson, and Peter Willemsen. Throwing versus walking as indicators of distance perception in similar real and virtual environments. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 2(1) :35–45, January 2005.
- [SG02] A. Simon and M. Gobel. The i-cone trade ; - a panoramic display system for virtual environments. In *Computer Graphics and Applications, 2002. Proceedings. 10th Pacific Conference on*, pages 3–7, 2002.
- [SG04] Alistair G. Sutcliffe and Brian Gault. Heuristic evaluation of virtual reality applications. *Interacting with Computers*, 16(4) :831–849, 2004.
- [Sim14] Mihael Simonic. Egocentric Distance Perception in Immersive Virtual Environments Using Verbal Estimates. Technical report, March 2014.
- [SK00] Alistair G. Sutcliffe and Deol K. Kaur. Evaluating the usability of virtual reality user interfaces. *Behaviour and Information Technology*, 19(6) :415–426, 2000.
- [SKHR02] A. Fleming Seay, David M. Krum, Larry Hodges, and William Ribarsky. Simulator sickness and presence in a high field-of-view virtual environment. In *CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '02*, pages 784–785, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [SLM12] Jonas Schild, Joseph LaViola, and Maic Masuch. Understanding user experience in stereoscopic 3d games. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12*, pages 89–98, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [Sny97] John P. Snyder. *Flattening the Earth - Two Thousand Years of Map Projections*. University of Chicago Press, 1997.
- [SOH98a] Michael J. Sinai, Teng Leng Ooi, and Zijiang J. He. Terrain influences the accurate judgement of distance. *Nature*, 395 :497–500, 1998.
- [SOH98b] Michael J. Sinai, Teng Leng Ooi, and Zijiang J. He. Terrain influences the accurate judgement of distance. *Nature*, 395 :497–500, 1998.
- [Sut68] Ivan E. Sutherland. A head-mounted three dimensional display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I, AFIPS '68 (Fall, part I)*, pages 757–764, New York, NY, USA, 1968. ACM.
- [SWR⁺] MJ Sinai, Krebs WK, Darken RP, JH Rowland, and JS McCarley. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*.
- [THIT04] K. Tanaka, J. Hayashi, M. Inami, and S. Tachi. Twister : an immersive autostereoscopic display. In *Virtual Reality, 2004. Proceedings. IEEE*, pages 59–278, March 2004.
- [TWG⁺04] William B. Thompson, Peter Willemsen, Amy A. Gooch, Sarah H. Creem-Regehr, Jack M. Loomis, and Andrew C. Beall. Does the quality of the computer graphics matter when judging distances in visually immersive environments. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 13(5) :560–571, October 2004.

- [VCOH14] Christoph Von Castell, Daniel Oberfeld, and Heiko Hecht. The effect of furnishing on perceived spatial dimensions and spaciousness of interior space. *PLoS ONE*, 9(11) :1–16, Nov 2014.
- [WAK⁺10] Mikael Wahlström, Miika Aittala, Helinä Kotilainen, Tiina Yli-Karhu, Janne Porkka, and Esa Nykänen. Cave for collaborative patient room design : analysis with end-user opinion contrasting method. *Virtual Reality*, 14(3) :197–211, 2010.
- [Wal99] David Waller. Factors affecting the perception of interobject distances in virtual environments. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 8(6) :657–670, December 1999.
- [WCCRT09] Peter Willemsen, Mark B. Colton, Sarah H. Creem-Regehr, and William B. Thompson. The effects of head-mounted display mechanical properties and field of view on distance judgments in virtual environments. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 6(2) :8 :1–8 :14, March 2009.
- [WGTCR08] Peter Willemsen, Amy A. Gooch, William B. Thompson, and Sarah H. Creem-Regehr. Effects of stereo viewing conditions on distance perception in virtual environments. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 17(1) :91–101, February 2008.
- [WHC15] Chinthake Wijesooriya, Jon Heales, and Peter Clutterbuck. Forms of formative assessment in virtual learning environments. In *Twenty-first Americas Conference on Information Systems*, 2015.
- [WM92] Davidson James N. Wojtowicz, Jerzy and William J. Mitchell. Design as digital correspondence. In *Mission - Method - Madnes - ACADIA Conference Proceedings*, pages 89–101, University of Arizon, Tucson, Arizona, USA, Novembre 1992.
- [WOH04] Bing Wu, Teng Leng Ooi, and Zijiang J. He. Perceiving distance accurately by a directional process of integrating ground information. *Nature*, 428 :73–77, 2004.
- [WR08] D. Waller and A. R RICHARDSON. Correcting distance estimates by interacting with immersive virtual environments : Effects of task and available sensory information. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 14(1) :61–72, 2008.
- [WRLP94] Cathleen Wharton, John Rieman, Clayton Lewis, and Peter Polson. Usability inspection methods. chapter The Cognitive Walkthrough Method : A Practitioner’s Guide, pages 105–140. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1994.
- [WS98] Bob G. Witmer and Michael J. Singer. Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 7(3) :225–240, 1998.
- [YMBH05] Sai Yerrapathruni, John I. Messner, Anthony J. Baratta, and Michael J. Horman. Using 4D CAD and Immersive Virtual Environments to Improve Construction Planning. 2005.
- [Zik07] Nevena Zikic. *Evaluating Relative Impact of VR Components Screen size, Stereoscopia and Field of View on Spatial Comprehension and Presence in Architecture*. PhD thesis, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA, 2007.

Exemples du questionnaire de compréhension spatiale, partie 1 (CS1)

Nous présentons quelques exemples du questionnaire CS1 correspondant aux plans des maisons présentés en Annexe B. Dans les questionnaires, en plus des questions, nous avons mis trois types d'indication :

1. Des précisions éventuelles orales,
2. des explications/significations associées à une valeur,
3. des commentaires *internes* (pour l'expérimentateur).

Questionnaire CS1 modèle 1

Essayez de répondre le mieux aux questions suivantes.

*Obligatoire

Identifiant du participant

Identifiant *

Séjour

1. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

longueur // mur cuisine

4.2

4.9

5.6

6.3

1. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

largeur // mur fenêtre

4.1

5

5.9

6.8

2. Imaginez que vous passez une soirée debout dans cette pièce avec une quinzaine de personnes, estimez-vous que l'espace disponible vous permettrait de vous sentir : *

1 2 3 4 5 6 7

Pas à l'aise Très à l'aise

3. Imaginez que vous passez une soirée debout dans cette pièce avec une quinzaine de personnes, pensez-vous que se déplacer pour aller au buffet serait : *

1 2 3 4 5 6 7

Difficile Facile

4. Si vous deviez partager un repas avec 8 convives à table, pensez-vous que vous seriez : *

4 - Coude à coude

1 2 3 4 5 6 7

Coller les un aux autres Espacer

5. Si vous deviez changer la table à manger déjà placée par une autre de 8 personnes, pensez-vous que l'espace serait : *

1 2 3 4 5 6 7

insuffisant Très suffisant

6. Si vous deviez vous installer sur le canapé avec 3 autres personnes, pensez-vous que vous seriez : *

4 - Coude à coude

1 2 3 4 5 6 7

Coller les un aux autres Espacer

7. Si vous deviez mettre 2 canapés de cette taille le long de ce mur, pensez-vous que l'espace serait : *

4 - Tout juste

1 2 3 4 5 6 7

insuffisant Très suffisant

Chambre 1

8. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Largeur // mur fenêtre

- 2.5
- 2.9
- 3.3
- 3.7

8. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Longueur // mur armoire

- 2.6
- 3.2
- 3.8
- 4.4

9. Si vous deviez réaménager la chambre en tournant le lit de 90°, pensez-vous que le déplacement dans la chambre serait : *

(Mettez le petit meuble dans le coin de la chambre, et le lit à peu près au milieu du mur où il y a l'armoire)

1 2 3 4 5 6 7

Difficile Facile

10. Si vous deviez placer l'armoire sur le mur de la fenêtre, pensez-vous que l'espace serait : *

(sans penser à l'ouverture de la fenêtre ou l'utilisation de l'armoire, dites uniquement s'il y a physiquement de la place) // 4 = tout juste

1 2 3 4 5 6 7

Insuffisant Très suffisant

11. Si vous deviez ranger la chambre avec 3 autres personnes, vous pensez que vous seriez : *

1 2 3 4 5 6 7

Pas à l'aise Très à l'aise

12. Si vous deviez réaménager la chambre comme une chambre parentale en plaçant un lit double, 2 tables de chevet, une armoire, pensez-vous que l'habitabilité de la pièce serait : *

(Le lit et les tables de chevet sur le mur de l'armoire et l'armoire sur le petit mur de la porte)

1 2 3 4 5 6 7

Très mauvaise Très bonne

Chambre 2

13. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Largeur // mur fenêtre

- 2.6
- 3.1
- 3.6
- 4.1

13. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Longueur // mur lit

- 2.6
- 3.2
- 3.8
- 4.4

14. Si vous deviez remplacer le lit de cette chambre par 3 lits simples, pensez-vous que l'habitabilité de la pièce serait : *

(Remplacez le lit double par 3 lits (un seul changement), vous gardez les 2 tables de chevet, un lit peut être collé au mur de la fenêtre)

1 2 3 4 5 6 7

Très mauvaise Très bonne

Salle de Bain / couloir

14. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce : *

Largeur // mur lavabo

- 1.5
- 1.9
- 2.3
- 2.7

15. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce : *

Longueur //mur baignoire

- 1.8
- 2.1
- 2.4
- 2.7

16. Si vous deviez vous brosser les dents à deux, pensez-vous que l'espace vous vous permettrait de vous sentir : *

1 2 3 4 5 6 7

Pas à l'aise Très à l'aise

17. Si vous deviez mettre un petit lave linge à côté du lavabo, pensez-vous que l'espace serait : *

// 4 - Tout juste

1 2 3 4 5 6 7

Insuffisant Très suffisant

18. Si vous deviez croiser une personne dans le couloir, vous pensez que l'espace disponible vous permettrait de le faire : *

1 2 3 4 5 6 7

Difficilement Facilement

19. Si vous deviez croiser une personne portant une valise dans le couloir, vous pensez que l'espace disponible vous permettrait de le faire : *

1 2 3 4 5 6 7

Difficilement Facilement

Taille et proportion

20. Quelle est la superficie totale de l'appartement ? *

- 45
- 55
- 65
- 75

21. Évaluez la difficulté pour estimer les dimensions des pièces et pour effectuer la visite virtuelle *

1 2 3 4 5 6 7

Facile à estimer Difficile à estimer

N'envoyez jamais de mots de passe via Google Forms.

100 % : vous avez réussi.

Questionnaire CS1 modèle 2

Essayez de répondre le mieux aux questions suivantes.

***Obligatoire**

Identifiant du participant

Identifiant

Séjour

1. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Largeur // mur fenêtre

2.9

3.4

3.9

4.4

1. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Longueur // mur canapé

4.3

5.2

6.1

7

2. Imaginez que vous passez une soirée debout dans cette pièce avec une dizaine de personnes, estimez-vous que l'espace disponible vous permettrait de vous sentir : *

1 2 3 4 5 6 7

Pas à l'aise Très à l'aise

3. Imaginez que vous passez une soirée debout dans cette pièce avec une dizaine de personnes, pensez-vous que se déplacer pour aller au buffet serait : *

1 2 3 4 5 6 7

Difficile Facile

4. Si vous deviez placer une table à manger rectangulaire de 8 personnes dans le salon, pensez-vous que l'espace serait : ? *

// 4- Mettre la table et avoir de la place pour s'asseoir

1 2 3 4 5 6 7

Insuffisant Très suffisant

5. Si vous deviez vous installer sur le canapé avec 9 autres personnes, pensez-vous que vous seriez : *

4 - Coude à coude

1 2 3 4 5 6 7

Coller les un aux autres Espacer

Chambre 1

6. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Largeur // mur fenêtre

2.7

3.1

3.6

3.9

6. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Longueur // mur bureau

2.3

2.9

3.5

4.1

7. Si vous deviez placer le lit et le bureau le long du mur de la fenêtre, pensez-vous que l'espace serait : *

Tourner le bureau de 90° et tourner le lit et les coller avec le mur de la fenêtre, il 4- avoir tout juste l'espace

1 2 3 4 5 6 7

Insuffisant Très suffisant

8. Si vous deviez remplacer le lit par un lit 2 places dans le même endroit, pensez-vous que l'espace serait : *

1 2 3 4 5 6 7

Insuffisant Très suffisant

9. Si vous deviez réaménager la chambre comme chambre parentale en plaçant un lit double, 2 tables de chevet, une armoire, pensez-vous que l'habitabilité de la pièce serait :

Un lit double sur le grand mur avec 2 table de chevet sur les cotés et une armoire sur le petit mur à la place du lit.

1 2 3 4 5 6 7

Très mauvaise Très bonne

Chambre 2

10. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Largeur // mur fenêtre

2.8

3.3

3.8

4.3

10. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Longueur //mur lit

2.4

3.1

3.8

4.5

11. Si vous deviez remplacer le lit de cette chambre par 2 lits simples, pensez-vous que l'habitabilité de la pièce serait : *

Un lit collé avec le mur, table de chevet un 2 ème lit, une table de chevet, l'armoire reste là où elle est.

1 2 3 4 5 6 7

Très mauvaise Très bonne

Salle de Bain / couloir

12. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce : *

Longueur // mur baignoire

- 2.3
- 2.6
- 2.9
- 3.2

12. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce : *

Longueur // mur lavabo

- 1.9
- 2.2
- 2.5
- 2.8

13. Si vous deviez vous brosser les dents à deux, pensez-vous que l'espace vous vous permettrait de vous sentir : *

1 2 3 4 5 6 7

Pas à l'aise Très à l'aise

14. Si vous deviez rapprocher le lavabo de la baignoire et mettre un petit lave linge à côté du lavabo, pensez-vous que l'espace serait : *

4 // Tout juste la place pour la glisser

1 2 3 4 5 6 7

Insuffisant Sufficient

15. Si vous deviez croiser 2 autres personnes dans le couloir, pensez-vous que l'espace disponible vous permettrait de le faire : *

1 2 3 4 5 6 7

Difficilement Facilement

16. Si vous deviez croiser une personne portant une valise dans le couloir, pensez-vous que l'espace disponible vous permettrait de le faire : *

1 2 3 4 5 6 7

Difficilement Facilement

Capacité et proportion

17. Quelle est la superficie totale de l'appartement ? *

- 47
- 57
- 67
- 77

18. Marquez la difficulté pour estimer les dimensions des pièces et pour effectuer la visite virtuelle : *

1 2 3 4 5 6 7

Facile Difficile

N'envoyez jamais de mots de passe via Google Forms.

100 % : vous avez réussi.

Questionnaire CS1 modèle 3

Essayez de répondre le mieux aux questions suivantes.

**Obligatoire*

Identifiant du participant

Identifiant *

Cuisine

1. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Largeur // mur évier

- 2.2
- 2.5
- 2.8
- 3.1

1. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Longueur // mur cuisinière

- 1.8
- 2.2
- 2.6
- 3

2. Si vous deviez réaménager la cuisine, vous enlevez le réfrigérateur et le meuble avec la plaque électrique et placez une cuisinière, lave linge et réfrigérateur à la place de la plaque électrique, les uns à côté des autres, pensez-vous que l'espace serait : ? *

4 - avoir tout juste la place

1 2 3 4 5 6 7

Insuffisant Très suffisant

3. Si vous deviez remplacer l'évier avec un nouveau plus petit et placer un lave linge avec ouverture dessus, pensez-vous que l'espace serait : *

4 - avoir tout juste l'espace

1 2 3 4 5 6 7

Insuffisant Très suffisant

Séjour

4. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Largeur // mur fenêtre

- 3.5
- 4
- 4.5
- 5

4. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Longueur // mur canapé

- 4
- 4.7
- 5.4
- 6.1

5. Imaginez que vous passez une soirée debout dans cette pièce avec cinq personnes, estimez-vous que l'espace disponible vous permettrait de vous sentir : *

1 2 3 4 5 6 7

Pas à l'aise Très à l'aise

6. Imaginez que vous passez une soirée debout dans cette pièce avec cinq personnes, pensez-vous que se déplacer pour aller au buffet serait : *

1 2 3 4 5 6 7

Difficile Facile

7. Si vous deviez placer une table à manger rectangulaire de 4 personnes entre le canapé et la cuisine, pensez-vous que l'espace serait : ? *

4 // Avoir tout juste la place pour la mettre et s'asseoir

1 2 3 4 5 6 7

Insuffisant Très suffisant

8. Si vous deviez vous installer sur le canapé avec 3 autres personnes, pensez-vous que vous seriez : *

4 - Coude à coude

1 2 3 4 5 6 7

Coller les un aux autres Espacer

Chambre 1

9. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Largeur // mur fenêtre

2.9

3.3

3.7

4.1

9. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Longueur // mur lit

3.3

4

4.7

5.4

10. Si vous deviez remplacer le lit de cette chambre par 2 lits simples, pensez-vous que l'habitabilité de la pièce serait : *

Remplacer le lit double par 2 lits simples, l'armoire reste à sa place, table de chevet, lit, table de chevet, lit.

1 2 3 4 5 6 7

Très mauvaise Très bonne

Salle de Bain / entrée

11. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Largeur, // mur toilette

- 2.1
- 2.5
- 2.9
- 3.3

11. Choisissez parmi les propositions suivantes les dimensions de la pièce *

Longueur, mur baignoire

- 2.1
- 2.5
- 2.9
- 3.3

12. Si vous deviez vous brosser les dents à deux, pensez-vous que l'espace vous vous permettrait de vous sentir : *

1 2 3 4 5 6 7

Pas à l'aise Très à l'aise

13. Si vous deviez croiser une personne portant une valise dans l'entrée, pensez-vous que l'espace disponible vous permettrait de le faire : *

1 2 3 4 5 6 7

Difficilement Facilement

14. Choisissez parmi les propositions suivantes la largeur du couloir : *

- 1.2
- 1.4
- 1.6
- 1.8

Capacité et proportion

15. Quelle est la superficie totale de l'appartement ? *

- 37
- 44
- 51
- 58

16. Marquez la difficulté pour estimer les dimensions des pièces et pour effectuer la visite virtuelle *

1 2 3 4 5 6 7

Facile Difficile

N'envoyez jamais de mots de passe via Google Forms.

100 % : vous avez réussi.

Annexe B

Exemples de réponses au questionnaire de compréhension spatiale, partie 2 (CS2)

Nous présentons les cartes cognitives correspondantes aux modèles 1, 2 et 3 respectivement. Les CS2 ont été dessinées par deux participants différents que nous désignons *X* et *Y*.



FIGURE B.1: Vue du haut de la première maison meublée (**modèle 1**).

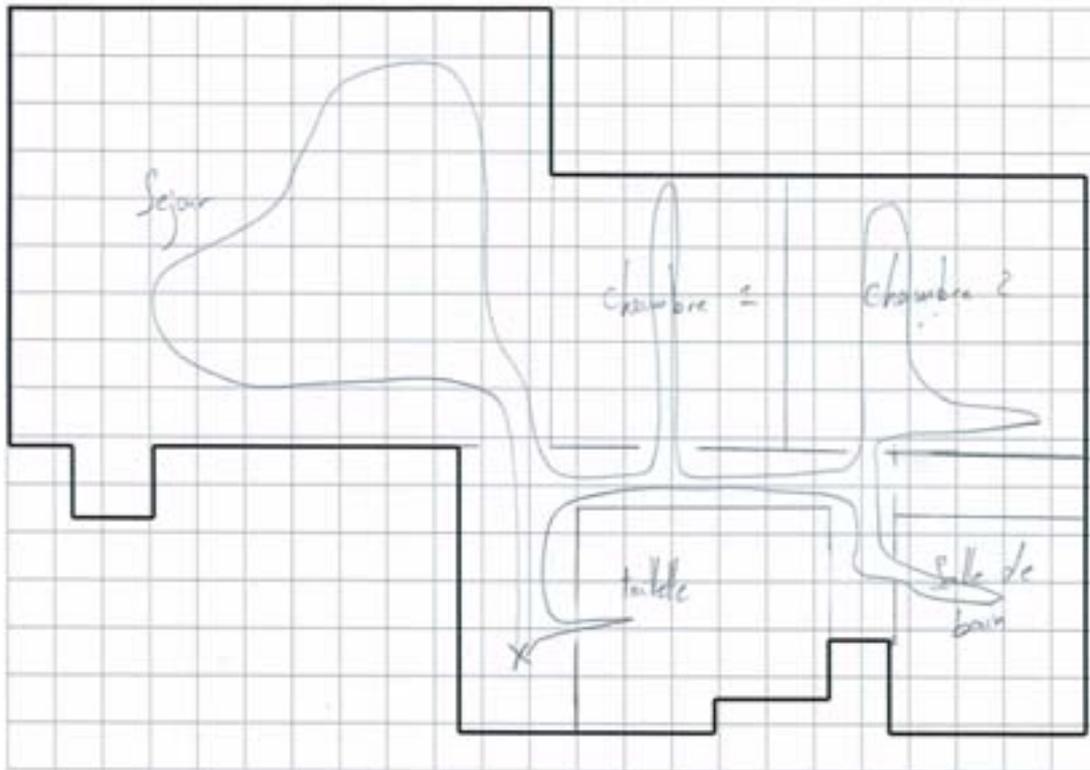


FIGURE B.2: Carte cognitive (CS2) du modèle 1 dessinée par le participant X.

Le score donné à la carte cognitive ci-dessus est de 4.5/5. Les différents points ont été attribués comme suit :

1. Le nombre et la fonctionnalité des pièces : 1,
2. la forme des pièces : 1
3. l'agencement : 0.75, nous avons enlevé 0.25 car sur le plan de la maison la salle de bain est collée à la chambre 2 et non pas séparée par un couloir,
4. les proportions : 0.75, nous avons enlevé 0.25 car les proportions entre la salle de bain et les toilettes n'ont pas été respectées,
5. l'ordre de la visite : 1.

Le score donné à la carte cognitive ci-dessous est de 5/5. Le participant a bien respecté tous les éléments de la carte cognitive.

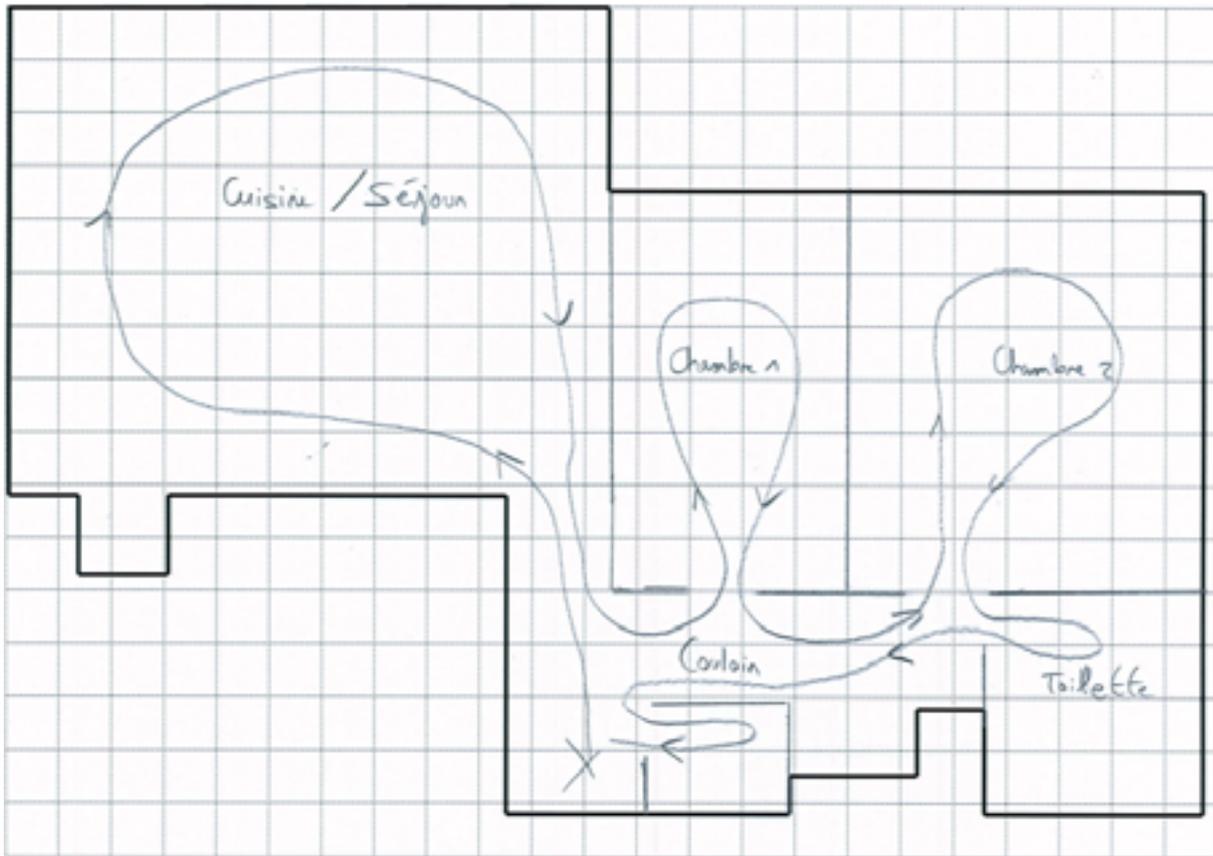


FIGURE B.3: Carte cognitive (CS2) du modèle 1 dessinée par le participant Y.



FIGURE B.4: Vue du haut de la deuxième maison meublée (**modèle 2**).

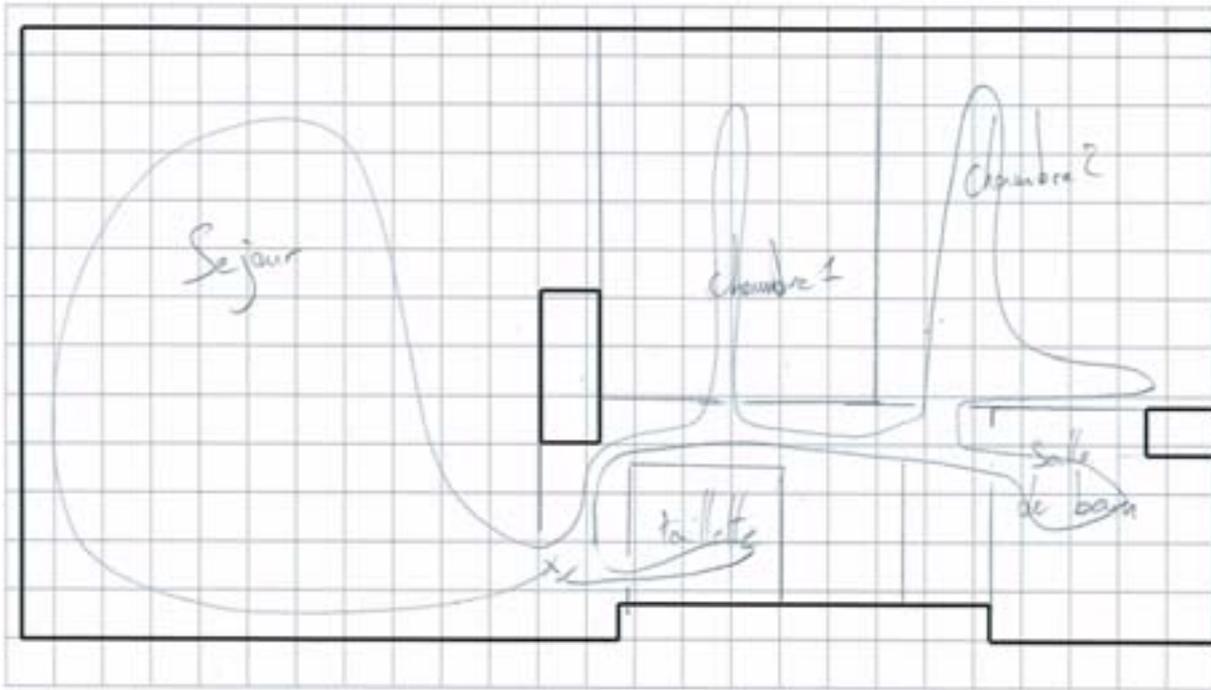


FIGURE B.5: Carte cognitive (CS2) du modèle 2 dessinée par le participant X.

Le score donné à la carte cognitive ci-dessus est de 4.5/5. Les différents points ont été attribués comme suit :

1. Le nombre et la fonctionnalité des pièces : 1,
2. la forme des pièces : 0.75, nous avons enlevé 0.25 car la forme du salon n'est pas conforme à sa forme sur le plan,
3. l'agencement : 0.75, nous avons enlevé 0.25 car sur le plan de la maison les toilettes se trouvent à côté du salon,
4. les proportions : 1,
5. l'ordre de la visite : 1.

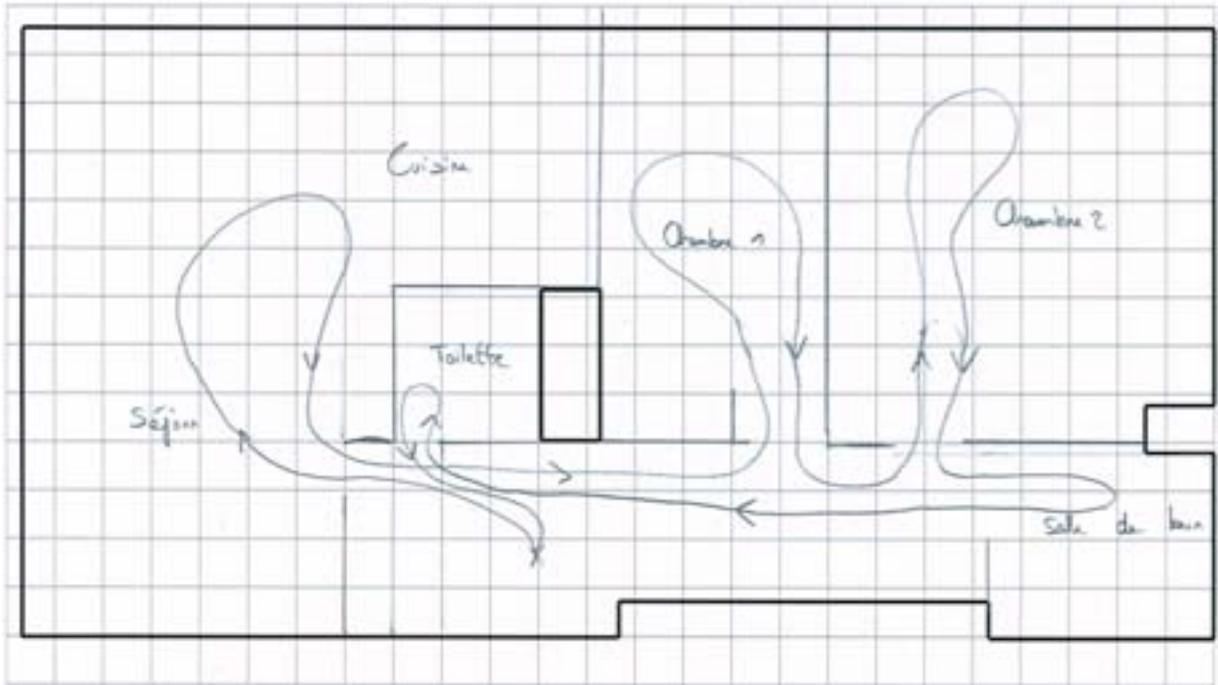


FIGURE B.6: Carte cognitive (CS2) du modèle 2 dessinée par le participant Y.

Le score donné à la carte cognitive ci-dessus est de 5/5. Le participant a bien respecté tous les éléments de la carte cognitive.



FIGURE B.7: Vue du haut de la troisième maison meublée (**modèle 3**).

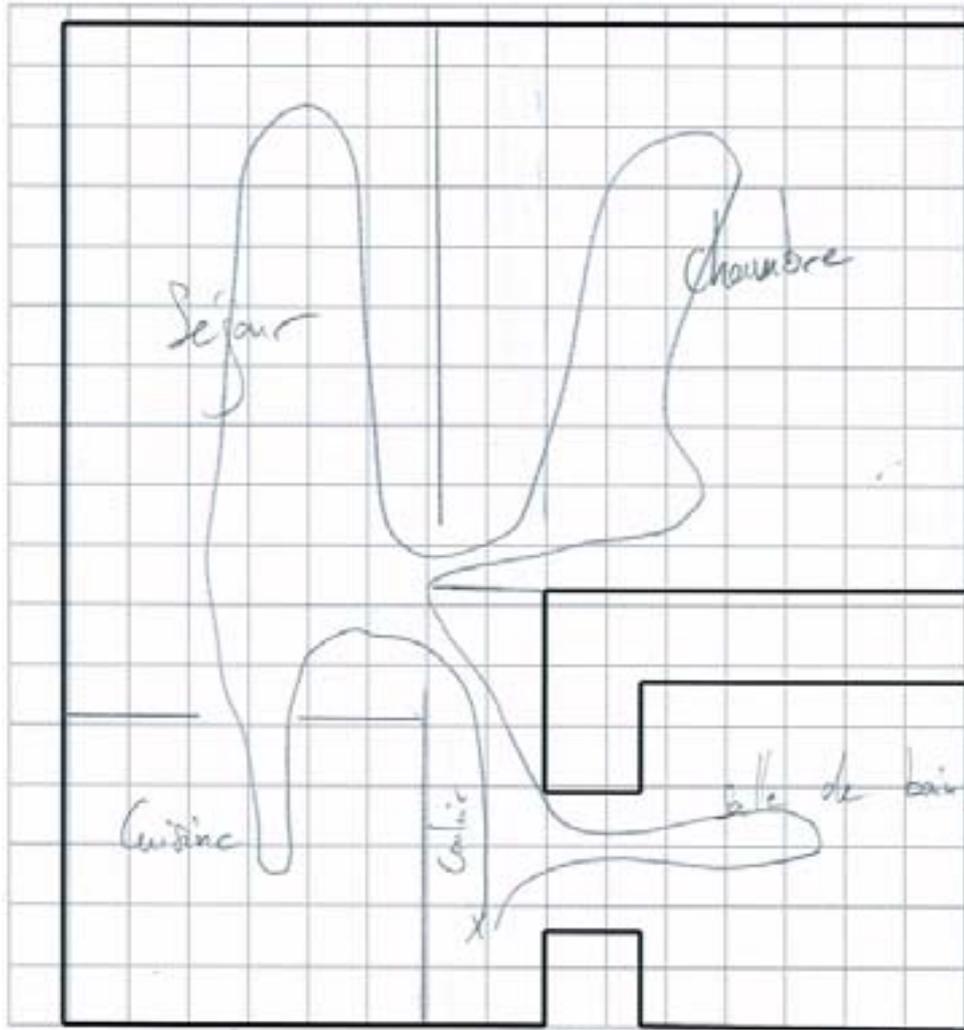


FIGURE B.8: Carte cognitive (CS2) du modèle 3 dessinée par le participant X.

Le score donné à la carte cognitive ci-dessus est de 4.25/5. Les différents points ont été attribués comme suit :

1. Le nombre et la fonctionnalité des pièces : 1,
2. la forme des pièces : 0.75, nous avons enlevé 0.25 car la forme de la chambre n'est pas bien respectée, sur la CS2 elle est presque de forme carrée,
3. l'agencement : 1,
4. les proportions : 0.5, nous avons enlevé 0.5 car les proportions entre la salle de bain et la cuisine et entre le séjour et la chambre n'ont pas été respectées,
5. l'ordre de la visite : 1.

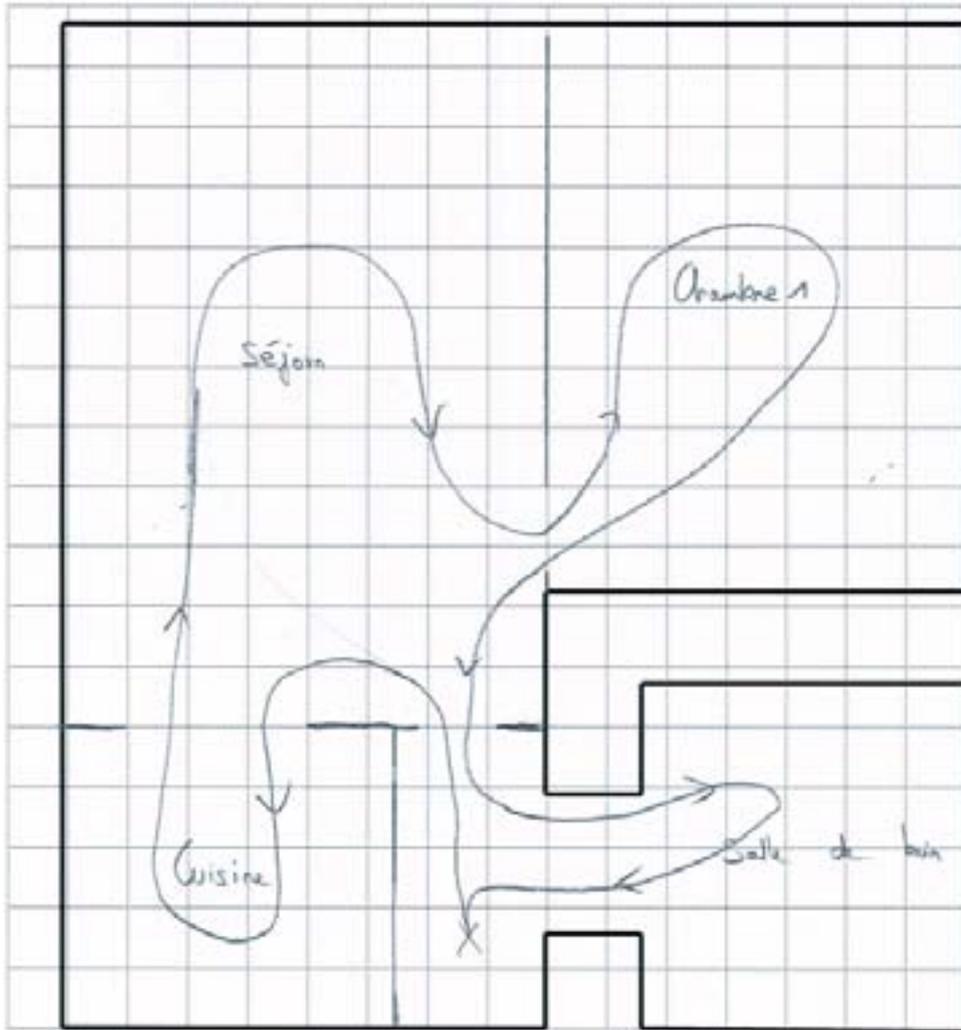


FIGURE B.9: Carte cognitive (CS2) du modèle 3 dessinée par le participant Y.

Le score donné à la carte cognitive ci-dessus est de 5/5. Le participant a bien respecté tous les éléments de la carte cognitive.